

N° d'ordre 24

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR ÈS-SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

par

ALFRED MONNIER

PREMIÈRE THÈSE

**Contribution à l'étude de l'efficacité des projecteurs
au travers d'atmosphères non limpides**

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le Mai 1936 devant la Commission d'Examen

MM. BLANC.	} Président	
CHAUVENET.		} Examinateurs
LE ROUX.		

PARIS
IMPRIMERIE SAUVION ET LELIÈVRE
25, Rue Vernier

—
1936

N° d'ordre 24

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR ÈS-SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

par

ALFRED MONNIER

PREMIÈRE THÈSE

**Contribution à l'étude de l'efficacité des projecteurs
au travers d'atmosphères non limpides**

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le Mai 1936 devant la Commission d'Examen

MM. BLANC.	Président
CHAUVENET.	Examineurs
LE ROUX.	

PARIS
IMPRIMERIE SAUVION ET LELIÈVRE
25, Rue Vernier

—
1936



A MA FEMME

A MON FILS

A Monsieur A. BLANC

Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Caen.

Hommage de ma profonde gratitude.

A Monsieur le Docteur NAVARRE

Professeur à l'Ecole de Médecine de Caen,
Sous-Directeur de l'Institut d'Hygiène
à la Faculté de Médecine de Paris.

Avec l'expression de ma profonde sympathie.

A MES COLLABORATEURS
ET A MES AMIS

Faculté des Sciences de l'Université de Caen

MM.

Doyen BLANC, Professeur.

Assesseur ZORETTI, Professeur.

Doyen honoraire BIGOT, Correspondant de l'Institut.

Professeur honoraire. MAURAIN, Doyen de la Faculté des Sciences de Paris

Professeurs.....	{	ZORETTI, Mécanique générale.
		BLANC, Physique et Minéralogie.
		MERCIER, Zoologie et Physiologie animale.
		CHAUVENET, Chimie générale.
		JANET, Calcul différentiel et intégral.
		CHOUX, Botanique.
		DANGEARD, Géologie et Paléontologie.
	{	AUDIGÉ, Zoologie.
		BOUYGUES, Botanique.

Maîtres de Conférences	{	LE ROUX, Physique.
		M ^{me} DEMASSIEUX, Chimie.

Secrétaire..... ROUX.

*La Faculté n'entend donner aucune appro-
bation ou improbation aux opinions émises
dans les thèses ; ces opinions doivent être
considérées comme propres à leurs auteurs.*

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
 CHAPITRE I. — Analyse et discussion des études effectuées par divers auteurs	 5
I. — Diffusion de la lumière par les milieux troubles	7
a) études théoriques	7
b) études expérimentales	10
II. — Transparence des brouillards artificiels	12
III. — Transparence des brouillards naturels	19
IV. — Transparence des atmosphères brumeuses ou limpides	22
V. — Visibilité au travers des brouillards naturels	26
VI. — Visibilité au travers d'atmosphères brumeuses ou limpides	32
VII. — Discussion des études	33
 CHAPITRE II. — Généralités sur les lumières et sur les états atmosphériques	 38
I. — Lumières colorées	38
II. — Etats atmosphériques	40
a) brouillards et brumes	41
b) atmosphères brumeuses et limpides	45
 CHAPITRE III. — Programme d'essais, instruments et métho- des de mesures	 48
I. — Déterminations préliminaires en laboratoire	48
a) détermination des caractéristiques des lumières	48
b) détermination des caractéristiques géométriques des lampes et des projecteurs	51
c) détermination du seuil de perceptibilité différentielle	53
d) détermination des brillances et des éclaircissements	56

II. — Détermination des propriétés optiques des atmosphères et des conditions météorologiques	59
III. — Détermination des propriétés optiques des atmosphères . .	65
a) mesure du coefficient de transparence d'une atmosphère pour une lumière complexe	65
b) mesure de la lumière diffusée en arrière	71
c) détermination de la distance limite de visibilité d'un test	71

CHAPITRE IV. — Résultats des essais 74

I. — Essais préliminaires en laboratoire	74
a) caractéristiques des lumières	74
b) caractéristiques géométriques des lampes et des projecteurs	96
c) détermination du seuil de perceptibilité différentielle. .	98
II. — Détermination des caractéristiques physiques des atmosphères et des conditions météorologiques	104
III. — Détermination des propriétés optiques des atmosphères. .	108
a) mesure du coefficient de transparence	108
b) mesure de la lumière diffusée en arrière	121
c) détermination de la distance limite de visibilité d'un test	126

CHAPITRE V. — Résumé et conclusions 133

BIBLIOGRAPHIE 137

INTRODUCTION

Le problème de la visibilité des obstacles au travers d'atmosphères non limpides a, depuis longtemps, retenu l'attention des savants et des techniciens; maints procédés ont été envisagés pour tenter d'accroître la portée des faisceaux lumineux : l'emploi de lumières colorées est certainement celui qui a fait l'objet du plus grand nombre de recherches.

Les résultats des expériences effectuées au cours de ces dernières années ont donné lieu à des conclusions souvent contradictoires.

En 1931, à Birmingham, le Comité des projecteurs d'automobiles de la Commission Internationale de l'Eclairage adoptait la résolution suivante : « l'emploi de faisceaux colorés pour la « conduite par temps de brouillard ne présente pas d'avantages ».

En 1935, à Berlin, la même Commission, saisie de documents nouveaux concernant des recherches faites en France un an auparavant, adoptait la proposition moins restrictive qui suit : « Les essais qui ont été effectués dans divers pays ont montré « qu'il n'y avait pas d'avantages à employer la lumière colorée « pour la circulation dans le brouillard. Le Comité propose de « poursuivre l'étude de l'application de la lumière colorée tant « au point de vue de l'éblouissement que de la visibilité dans « des états atmosphériques différents ».

Or, durant les années qui s'écoulèrent entre ces deux réunions, un verre jaune au sulfure de cadmium a été utilisé dans la fabrication des ampoules de lampes à incandescence pour projecteurs d'automobiles.

De nombreuses études ayant mis en valeur certains effets physiologiques remarquables de la lumière jaune obtenue à l'aide de ces lampes, j'ai été conduit à effectuer des essais comparatifs de visibilité dans des atmosphères non limpides avec des faisceaux de lumière ordinaire et des faisceaux de lumière colorée.

Les constatations faites simultanément par plusieurs auteurs et par moi-même firent ressortir qu'une amélioration très nette de la portée des projecteurs d'automobiles pouvait être obtenue en lumière jaune, et que cette amélioration était plus marquée pour les brumes légères que pour les brouillards épais.

A la même époque, de nombreux médecins habitant différentes régions de France faisaient part des avantages que la lumière jaune avait révélés pour la conduite par temps de pluie et de brouillard ⁽¹⁾.

Les travaux de MM. Jean REY et André BLONDEL ⁽²⁾, qui remontent à une vingtaine d'années, avaient déjà attiré l'attention sur l'utilisation de réflecteurs dorés et sur les avantages de la lumière jaune par atmosphère brumeuse, en particulier la réduction notable du halo autour des projecteurs.

Ces faits remarquables en eux-mêmes et en opposition avec les conclusions des deux derniers Congrès Internationaux de l'Eclairage, m'ont engagé à entreprendre une étude plus approfondie de la transmission des lumières colorées et de la visibilité de tests dans des conditions atmosphériques aussi différentes que possible.

Les données du problème étant variées et complexes, il m'a semblé qu'il fallait probablement attribuer les résultats contradictoires obtenus par certains auteurs au fait qu'ils n'avaient pas suffisamment tenu compte de l'importance de ces données.

Il m'a paru dès lors nécessaire d'analyser certains travaux importants sur la transmission des lumières simples et complexes dans les milieux troubles proprement dits, dans les brouillards artificiels et naturels et dans les atmosphères limpides.

(1) La Quinzaine Médicale, décembre 1933 et mai 1934.

(2) Voir les Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences, t. 188, p. 1198, 1934.

De ces analyses préliminaires j'ai dégagé un certain nombre d'enseignements qui m'ont aidé à poursuivre, sur des bases bien définies, la présente étude qui se rattache plus particulièrement à la circulation des véhicules automobiles.

Les nombreux essais effectués de nuit ont exigé des opérateurs un effort soutenu dans des conditions souvent pénibles : je leur exprime mes remerciements très sincères pour la collaboration qu'ils m'ont apportée.

Enfin, je demeure respectueusement reconnaissant à M. le Général GEST, Directeur de la Gendarmerie au Ministère de la Guerre, d'avoir grandement facilité la réalisation de mes essais en me procurant en tous lieux l'appui courtois de ses Légions.

CHAPITRE I

ANALYSE ET DISCUSSION DES ÉTUDES EFFECTUÉES PAR DIVERS AUTEURS

Avant d'analyser les études qui ont été effectuées sur la diffusion de la lumière par les milieux troubles, il convient de rappeler quelques généralités.

On sait qu'un milieu trouble est constitué par des particules d'une matière transparente en suspension dans une autre matière transparente, mais d'indice de réfraction différent.

La diffusion de la lumière est due au phénomène de diffraction lorsque les dimensions des particules sont très petites par rapport aux longueurs d'onde, les phénomènes de réflexion et de réfraction agissant de façon prépondérante lorsque les dimensions des particules sont notables par rapport aux longueurs d'onde.

Considérons un milieu trouble limité par une surface cylindrique droite et supposons qu'une des bases reçoive un faisceau lumineux dirigé suivant l'axe du cylindre.

Les rayons qui traversent le cylindre sans rencontrer de particules sortent par la base opposée comme si le milieu n'était pas trouble; les rayons qui rencontrent des particules sont dispersés dans toutes les directions et sortent par les bases et la surface latérale.

Si F_i est le flux incident, F_t le flux transmis régulièrement, le rapport

$$\tau = \frac{F_t}{F_i} \quad (1)$$

est le facteur de transmission régulière du milieu trouble.

En raison des diffusions successives qui se produisent dans un milieu trouble d'épaisseur finie, il est extrêmement compliqué d'étudier la loi de transmission de la lumière diffuse ; seule la loi de transmission de la lumière directe est susceptible d'être connue et d'être exprimée sous une forme mathématique simple.

En dehors de toute hypothèse sur la constitution du milieu trouble autre que celle de son homogénéité, on peut établir facilement la relation qui existe, pour une radiation monochromatique de longueur d'onde déterminée, entre le facteur de transmission régulière τ et l'épaisseur x traversée.

Si nous raisonnons, non plus sur un cylindre d'épaisseur finie, mais sur une tranche d'épaisseur dx , nous pouvons écrire que le flux absorbé et le flux diffusé sont proportionnels à l'épaisseur. La tranche dx absorbe un flux $a Fdx$ et diffuse un flux $k Fdx$; le flux $(a + k) Fdx$ est celui qui disparaît du faisceau. L'équation qui représente la variation du flux transmis régulièrement en fonction de l'épaisseur est donc

$$dF = - (a + k) Fdx .$$

En intégrant pour une épaisseur x du milieu, on a

$$F_t = F_i e^{-(a + k)x} ,$$

d'où

$$\tau = e^{-(a + k)x} . \quad (2)$$

On appelle a le coefficient d'absorption, k le coefficient de diffusion et $a + k$ le coefficient de transparence.

Le flux qui sort dans la direction de l'axe du cylindre par la face opposée à la base d'entrée se compose du flux transmis régulièrement et du flux diffusé dans cette direction : il est expérimentalement impossible de séparer ces flux l'un de l'autre.

1. - Diffusion de la lumière par les milieux troubles.

a) Etudes théoriques.

Dans ses travaux mémorables sur la diffraction de la lumière solaire par les molécules de l'atmosphère, Lord RAYLEIGH ⁽¹⁾ a montré que le flux lumineux diffusé par une particule de forme quelconque, dont les dimensions sont petites devant les longueurs d'onde des radiations, est proportionnel au carré du volume de cette particule et inversement proportionnel à la quatrième puissance de la longueur d'onde.

Lord RAYLEIGH a étendu ce résultat aux milieux formés par un grand nombre de sphérules semblables.

En supposant que le milieu n'est pas absorbant et que la lumière diffusée par une sphérule n'en rencontre plus d'autres, on peut admettre que le flux total diffusé par le milieu trouble s'obtient en multipliant le flux lumineux diffusé par une sphérule par le nombre total de sphérules.

Le cas plus complexe, où les sphérules reçoivent la lumière déjà diffusée par les autres sphérules, a été étudié par LORENTZ ⁽²⁾ et par MAXWELL ⁽³⁾.

L'hypothèse d'une faible concentration particulaire a permis à Lord RAYLEIGH d'établir que le flux lumineux total diffusé, c'est-à-dire le flux résultant de la composition de toutes les ondes secondaires émises par les sphérules, est proportionnel à

$$k = 24 \pi^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \frac{N v^2}{\lambda^4}, \quad (3)$$

N étant le nombre de sphérules par unité de volume de milieu trouble, v le volume d'une sphérule et m l'indice de réfraction relatif des matières particulaire et interparticulaire.

Cette formule indique qu'à concentration constante le flux lumineux diffusé par un milieu trouble est proportionnel au volume des sphérules.

(1) Lord Rayleigh. — Phil. Mag., 4^e série, t. 41, 1871; 5^e série, t. 12, 1881; 5^e série, t. 47, 1899.

(2) L. Lorentz. — Wied. Ann. der Phys., t. 11, 1880.

(3) J. C. Maxwell. — Phil. Trans., t. 203, 1904; t. 205, 1906.

Si l'indice de réfraction relatif ne varie pas avec la longueur d'onde, c'est-à-dire si les matières particulaire et inter-particulaire sont incolores, les radiations de courte longueur d'onde prédominent dans la lumière diffusée.

Comme l'expression (3) caractérise le flux lumineux perdu par l'onde primaire, le facteur de transmission régulière est donné, pour une épaisseur x du milieu, par la formule

$$\tau = e^{-kx} \quad (4)$$

Dans ses études purement mathématiques concernant les milieux troubles et plus spécialement les solutions métalliques colloïdales, MIE ⁽¹⁾ s'est proposé de donner, en partant de la théorie électromagnétique de la lumière, l'explication exacte et complète de tous les phénomènes de diffusion, de polarisation et de coloration.

MIE écrit les équations de MAXWELL et, considérant une onde plane qui tombe sur une sphérule, cherche les équations représentant l'onde lumineuse rayonnée par la sphérule.

Il arrive à cette conclusion que la lumière rayonnée se compose d'un nombre limité d'ondes partielles qui augmente avec le diamètre de la sphérule.

Lorsque le diamètre est petit, la première onde partielle est prépondérante et peut être seule considérée; mais lorsque le diamètre est grand, il est nécessaire de tenir compte des deuxième et troisième ondes partielles. La première onde partielle n'est autre que celle indiquée par la théorie de Lord RAYLEIGH.

Les formules générales de MIE peuvent théoriquement s'appliquer à tous les phénomènes dispersifs d'origine particulaire, comme par exemple ceux qui se produisent sur de grosses gouttelettes de brouillard ou de pluie, mais les calculs sont extrêmement compliqués.

En faisant les mêmes hypothèses que précédemment, MIE aboutit à des équations qui permettraient de calculer, pour un faisceau incident de lumière naturelle, le flux lumineux

(1) G. Mie. — Ann. der Phys., t. 25, p. 377, 1908.

total diffusé, l'intensité de la lumière diffusée dans n'importe quelle direction du plan passant par le faisceau incident, le degré de polarisation et le coefficient d'absorption.

De cette remarquable étude, nous extrairons seulement la formule qui donne le flux lumineux total diffusé par la première onde partielle,

$$k = 24 \pi^3 u_1 \left(\frac{m^2 - v_1}{m^2 + 2w_1} \right)^2 \frac{N v^2}{\lambda^4}, \quad (5)$$

dans laquelle u_1 , v_1 et w_1 sont des fonctions complexes de $\frac{d}{\lambda}$ et de $\frac{m d}{\lambda}$ qui tendent vers l'unité lorsque le diamètre d des sphérules tend vers zéro.

Cette formule s'applique aux milieux troubles formés de grosses particules ; le coefficient de transparence est alors une fonction périodique du diamètre des particules décroissant lorsque celui-ci augmente.

D'après MIE la lumière diffusée par un milieu trouble constitué par des sphérules diélectriques incolores est blanche lorsque le diamètre est assez grand (cas d'un jet de vapeur).

Si un faisceau de lumière naturelle traverse un milieu trouble, la lumière diffusée latéralement est, en partie ou en totalité, polarisée rectilignement. Dans le cas de particules très petites, la lumière est entièrement polarisée dans les directions perpendiculaires au faisceau incident ; lorsque le diamètre des particules augmente, la proportion de lumière polarisée diminue, et les directions suivant lesquelles la polarisation est maximum tendent à se rapprocher de celle du faisceau incident.

BROMWICH ⁽¹⁾, se basant également sur la théorie électromagnétique de la lumière, a obtenu des formules ressemblant à celles de MIE, et GANS ⁽²⁾ a étendu la théorie de MIE à de très petites particules en forme d'ellipsoïdes.

Il est intéressant de signaler que, d'après cet auteur, une

(1) T. S. Bromwich. — Phil. Mag., série 6, t. 143, 1919 ; Phil. Trans. Roy. Soc., t. 220, 1920.

(2) R. Gans. — Ann. der Phys., t. 37, 1912 ; t. 47, 1915 ; t. 62, 1920 ; t. 76, 1925.

petite modification de la forme de la particule peut avoir une influence considérable sur la diffusion de la lumière.

Utilisant les formules établies par MIE et par Lord RAYLEIGH, BLUMER ⁽¹⁾ a effectué de nombreux calculs numériques qui permettent de déterminer pratiquement l'intensité de la lumière diffusée dans une direction quelconque par des sphérules dont le diamètre est au plus égal à quatre fois la longueur d'onde ; aucun calcul numérique ne peut être effectué pour des sphérules d'un diamètre supérieur à cette valeur en raison de la complexité des formules de MIE.

Divers auteurs, en particulier WIENER ⁽²⁾ et MECKE ⁽³⁾, ont appliqué les lois de la réflexion et de la réfraction aux grosses particules transparentes et ont obtenu des formules donnant lieu à des calculs moins compliqués que ceux auxquels conduisent les formules de MIE.

WIENER tient compte des réflexions et des réfractions successives ; MECKE développe une théorie où la diffusion est produite d'une part par réflexion et réfraction de la lumière qui tombe sur les sphérules, d'autre part par diffraction de la lumière qui ne les rencontre pas.

b) *Etudes expérimentales.*

Lorsque les dimensions des particules ne sont pas petites devant les longueurs d'ondes, les radiations de courte longueur d'onde sont moins diffusées que ne l'indique la loi de RAYLEIGH.

BOUTARIC ⁽⁴⁾ a vérifié qu'une expression de la forme

$$\tau = e^{-\frac{hx}{\lambda^n}}, \quad (6)$$

dans laquelle n est inférieur à 4, peut représenter les résultats obtenus par l'expérience.

(1) H. Blumer. — Zeits. für Phys., t. 32, p. 119, 1925 ; t. 38, p. 304, 1926 ; t. 38, p. 920, 1926 ; t. 39, p. 195, 1926.

(2) C. Wiener. — Abh. der Kaiser Leopold Carol Deutsch Akad., p. 73, 1907 ; p. 91, 1909.

(3) R. Mecke. — Ann. der Phys., t. 65, p. 257, 1921.

(4) A. Boutaric. — Thèse de Doctorat, p. 82, Paris 1918.

En opérant sur des précipités de chlorure d'argent, BOUTARIC, a constaté que les courbes de n en fonction de τ passaient par le point fictif de coordonnées $n = 4$ et $\tau = 1$.

Ces expériences montrent, en accord avec la loi de Lord RAYLEIGH, que l'exposant n est égal à 4 lorsque les particules sont très petites et non absorbantes.

Reprenant l'étude sous la forme envisagée par BOUTARIC, CHENEVEAU et AUDUBERT ⁽¹⁾ ont indiqué que l'on pouvait appliquer aux milieux troubles formés par de grosses particules la formule

$$\tau = e^{-\frac{A N d}{\lambda^n}}, \quad (7)$$

N et d ayant les mêmes significations que dans les formules précédentes, et A étant un coefficient dépendant des propriétés optiques des granules et du milieu intergranulaire.

Ces auteurs ont montré que l'exposant n est une fonction de N et d qui peut prendre toutes les valeurs possibles positives ou négatives, entre une limite supérieure $+4$ et une limite inférieure égale à -1 dans leurs expériences. Quand n est positif, le milieu diffuse davantage les petites longueurs d'onde ; le contraire a lieu quand n est négatif, les radiations rouges étant plus diffusées que les radiations bleues.

A diamètre constant, la dispersion du milieu étant seulement fonction du nombre des particules, l'exposant n peut passer d'une valeur négative à une valeur positive, lorsque N diminue. L'on aboutit aux mêmes conclusions en supposant constant le nombre des particules et en faisant décroître leur diamètre.

Opérant sur des suspensions de gomme-gutte et de mastic, d'un diamètre de 1,7 micron, CHENEVEAU et AUDUBERT ont trouvé pour la première suspension que n passait de $-0,75$ à $+0,70$ lorsque N variait de 4×10^7 à 5×10^6 sphérules par centimètre cube, et pour la seconde que n passait de $-0,51$ à $+1,00$ lorsque N variait de $2,5 \times 10^8$ à $1,6 \times 10^7$ sphérules par centimètre cube.

(1) Cheneveau et Audubert. — Compt. rend. Acad. des Scien., t. 168, p. 553 et 684, 1919.

Enfin, ces auteurs ont constaté que le facteur de transmission régulière était une fonction du diamètre et du volume total des sphérules en suspension comme l'indique la formule

$$\tau = 1 - e^{-\frac{A d^{\beta}}{(N d^3)^{\alpha}}}, \quad (8)$$

α est indépendant de la nature des sphérules, au contraire β et A en dépendent ; β est indépendant de la longueur d'onde, au contraire α et A en dépendent et varient dans le même sens que celle-ci.

II. - Transparence des brouillards artificiels.

RUDOLPH ⁽¹⁾ a mesuré la transparence de certains brouillards artificiels obtenus en projetant un jet continu de vapeur d'eau dans un cylindre d'un mètre de longueur.

Les expériences auxquelles il s'est livré lui ont montré que les brouillards artificiels épais (brouillards d'un facteur de transmission métrique de l'ordre de 0,02) étaient plus transparents aux radiations vertes et bleues qu'aux radiations oranges et rouges.

Cette conclusion peut être comparée à celle de CHENEVEAU et AUDUBERT ⁽²⁾ qui ont trouvé qu'un milieu trouble peut diffuser davantage le rouge que le bleu quand l'exposant n de leur formule est négatif, c'est-à-dire quand le nombre et le diamètre des particules sont grands.

RUDOLPH émet toutefois l'opinion que les brouillards naturels légers se comportent d'une façon toute différente en transmettant mieux les radiations rouges que les radiations bleues.

Dans la première partie de son étude relative aux observations concernant la diffusion de la lumière dans un brouillard d'eau, POKROWSKY ⁽³⁾ décrit un appareil pour produire des brouillards artificiels par condensation d'un jet de vapeur au contact de l'air. Il détermine d'abord la grosseur des gouttelettes par un calcul compliqué basé sur la vitesse de conden-

(1) A. Rudolph. — Phys. Zeits., t. 5, p. 57, 1904.

(2) C. Cheneveau et R. Audubert. — Compt. rend. Acad. des Scien., t. 168, p. 684, 1919.

(3) G. I. Pokrowski. — Zeits. für Phys., t. 43, p. 394, 1927.

sation et trouve ainsi que, dans ses expériences, les gouttelettes avaient un diamètre de 0,2 à 0,7 micron. Comparant les courbes qu'il obtient en mesurant l'intensité de la lumière diffusée dans différentes directions par le brouillard avec celles obtenues en appliquant les formules de BLUMER ⁽¹⁾, il conclut à leur analogie.

Dans la seconde partie de son étude, après avoir rappelé que si l'on considère des particules relativement grosses, la diffusion de la lumière est due aux phénomènes de réfraction et de réflexion, POKROWSKI ⁽²⁾ décrit un dispositif à air comprimé permettant d'obtenir des brouillards à grosses gouttelettes. Il compare les résultats obtenus expérimentalement dans ces brouillards à ceux auxquels on aboutit en appliquant les formules de WIENER ⁽³⁾ et, constatant que les courbes expérimentales et théoriques présentent des maximum et des minimum pour les mêmes angles, déduit que ses expériences vérifient la théorie.

ANDERSON ⁽⁴⁾ a imaginé une méthode pour obtenir des brouillards artificiels comparables, selon lui, aux brouillards naturels et a mesuré la transmission d'un certain nombre de radiations visibles et invisibles au travers d'un brouillard de ce genre.

Il a constaté que le facteur de transmission présentait un minimum dans le spectre visible et que la position de ce minimum était fonction de la dimension des particules.

Il a ainsi reconnu que la formule de KING ⁽⁵⁾

$$\tau = e^{-\left(a + \frac{h}{\lambda^4}\right)x} \quad (9)$$

n'était pas applicable à la transmission des radiations au travers d'un brouillard, contrairement aux conclusions de GRANATH et HULBURT ⁽⁶⁾ qui seront exposées plus loin.

(1) H. Blumer. — Zeits. für Phys., t. 32, p. 119, 1925; t. 38, p. 304, 1926.

(2) G. I. Pokrowski. — Zeits. für Phys., t. 43, p. 769, 1927.

(3) Wiener. — Loc. cit.

(4) S. H. Anderson. — Phys. Rev., vol. 38, p. 1012, 1931.

(5) King. — Proc. Trans. Roy. Soc., t. 88, p. 83, 1913.

(6) L. P. Granath et E. O. Hulburt. — Phys. Rev., vol. 34, p. 140, 1929.

HOUGHTON ⁽¹⁾ a entrepris une série de mesures sur un brouillard artificiel produit par la condensation de vapeur d'eau à basse pression dans un tube d'une longueur de 3 mètres.

Les mesures ont été faites dans le spectre visible à l'aide d'une lampe électrique devant laquelle pouvaient être placés des filtres transmettant chacun une bande spectrale d'environ 500 Angströms de largeur ; l'ensemble des filtres recouvrait complètement le spectre visible.

Les brouillards produits étaient caractérisés numériquement par la valeur du facteur de transmission pour une lumière déterminée.

HOUGHTON a tracé, à l'aide d'une cellule photoélectrique, les courbes du facteur de transmission en fonction de la longueur d'onde pour différents brouillards formés de particules

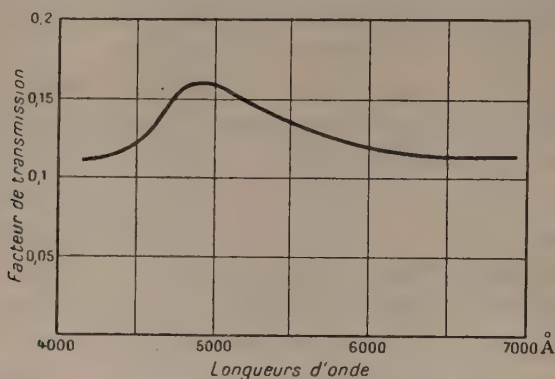


Fig. 1. — Courbe du facteur de transmission d'un brouillard artificiel en fonction de la longueur d'onde (d'après Houghton).

d'un diamètre de 2 à 3 microns. Ces courbes, qui ont toutes l'allure de celle de la fig. 1, présentent un maximum à 4 900 Angströms et une pente plus accentuée du côté des petites longueurs d'onde que du côté des grandes.

HOUGHTON rappelle les travaux d'UTTERBACK ⁽²⁾ qui situent un maximum du facteur de transmission à 5 600 Angströms et

(1) H. G. Houghton. — Phys. Rev., vol. 38, p. 152, 1931.

(2) C. L. Utterback. — Trans. Ill. Eng. Soc., t. 14, p. 133, 1919.

explique que ce déplacement du maximum semble résulter de l'utilisation par cet auteur d'un photomètre visuel qui fait intervenir la sensibilité de l'œil.

BORN et FRANZ ⁽¹⁾ ont effectué d'importantes recherches sur des brouillards d'eau artificiels, formés de gouttelettes d'un diamètre de 6 microns, qu'ils produisaient au moyen de nombreux jets de vapeur dans une salle de 35 mètres de longueur.

Ces auteurs ont admis que le coefficient de transparence, mesuré dans des conditions expérimentales données, pouvait caractériser numériquement un brouillard.

A cet effet ils utilisaient une cellule photoélectrique diaphragmée de manière qu'elle reçût le moins possible de lumière diffuse et ils déduisaient le coefficient de transparence de la formule

$$E = E_0 e^{-kx}$$

dans laquelle E et E_0 sont les éclairagements sur la cellule en présence et en l'absence de brouillard, et x la distance de la source lumineuse à la cellule.

Le coefficient de transparence k ainsi déterminé dépend essentiellement de l'angle d'ouverture du cône ayant pour sommet le milieu de la cellule et pour base le diaphragme; il ne peut, par conséquent, caractériser un brouillard que si cet angle est constant.

Pour la commodité des mesures, BORN et FRANZ avaient choisi un angle de 10 degrés ou de 2 degrés selon que la source lumineuse était une lampe nue ou un projecteur d'automobiles.

Les auteurs mesurent l'éclairement produit par la lumière diffuse en fonction du coefficient de transparence k du brouillard, de la distance x et de l'angle φ que fait la direction du flux incident avec la normale à la cellule.

Dans le cas d'une source à rayonnement non dirigé (lampe nue) ils trouvent que cet éclairement croît proportionnellement à k pour la lumière diffusée en arrière, mais qu'il croît moins vite pour la lumière diffusée en avant; ils trouvent aussi que

(1) F. Born et K. Franz. — Das Licht, t. 3, p. 225, 1933; t. 8, p. 187, 1935.

cet éclaircissement diminue quand la distance x et l'angle φ augmentent.

Dans le cas d'une source à rayonnement dirigé (projecteur d'automobiles), ils constatent qu'il existe, en fonction du coefficient de transparence, une distance x et un angle φ pour lesquels l'éclaircissement produit par la lumière diffusée est maximum.

La conclusion de cette étude est que la lumière est surtout diffusée dans des directions voisines de celle du rayon incident.

Les propriétés spectrales du brouillard sont ensuite étudiées en utilisant comme source lumineuse, soit des lampes électriques à décharge munies de filtres laissant passer certaines radiations, soit des lampes électriques à incandescence fonctionnant à des températures différentes.

BORN et FRANZ mesurent les coefficients de transparence des brouillards pour ces différentes lumières et concluent que dans le cas de brouillards très opaques, la lumière rouge est notablement plus diffusée que les autres lumières qui le sont à peu près également (fig. 2).

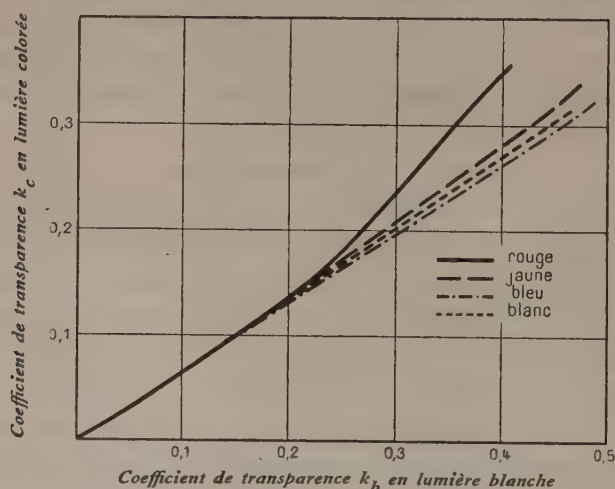


Fig. 2.— Courbes du coefficient de transparence d'un brouillard en lumières rouge, jaune, bleue et blanche en fonction du coefficient de transparence de ce même brouillard pour une certaine lumière blanche choisie comme référence (d'après Born et Franz).

Enfin, ils terminent leur étude par une récapitulation des propriétés dispersives des gouttelettes et formulent des conclusions analogues à celles de divers auteurs :

1° lorsque le diamètre des gouttelettes est plus petit que la longueur d'onde, l'intensité de la lumière diffusée est la même dans toutes les directions et les radiations bleues sont plus dispersées que les radiations rouges (cas des fumées);

2° lorsque le diamètre des gouttelettes est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, la lumière diffusée présente plusieurs maximum d'intensité;

3° lorsque le diamètre des gouttelettes est plus grand que la longueur d'onde, l'intensité de la lumière diffusée est maximum dans la direction du rayon incident et les radiations rouges sont plus dispersées que les radiations bleues.

Dans ce dernier cas, on observe souvent des anneaux de diffraction qui permettent de calculer le diamètre des gouttelettes par la formule générale

$$\theta = K \frac{2 \lambda}{d}; \quad (10)$$

θ étant le demi-angle sous lequel l'anneau est vu, d le diamètre des gouttelettes et K une constante dépendant de l'anneau considéré.

Cette constante est égale à 0,610 pour le premier minimum et à 1,116 pour le second minimum.

KULB ⁽¹⁾ a mesuré la transparence spectrale de quelques brouillards artificiels hygroscopiques d'opacité différente qu'il produisait dans une salle de 7 mètres de longueur. Ces brouillards étaient formés de particules d'un diamètre compris entre 1 et 2 microns.

Le rayonnement transmis par le brouillard était dirigé à travers un écran coloré sur une pile thermoélectrique.

KULB a constaté, que le coefficient de transparence des brouillards d'acide diminue quand la longueur d'onde augmente.

(1) W. Kulb. — Thèse, Erlangen 1931; Ann. der. Phys., t. 31, p. 679, 1931.

Après avoir donné un aperçu de la composition des verres jaunes au sulfure de cadmium, MOUTON ⁽¹⁾ indique les principales caractéristiques de la lumière émise par des filaments de tungstène placés dans des ampoules fabriquées avec ce verre et étudie sur un grand nombre d'observateurs les effets

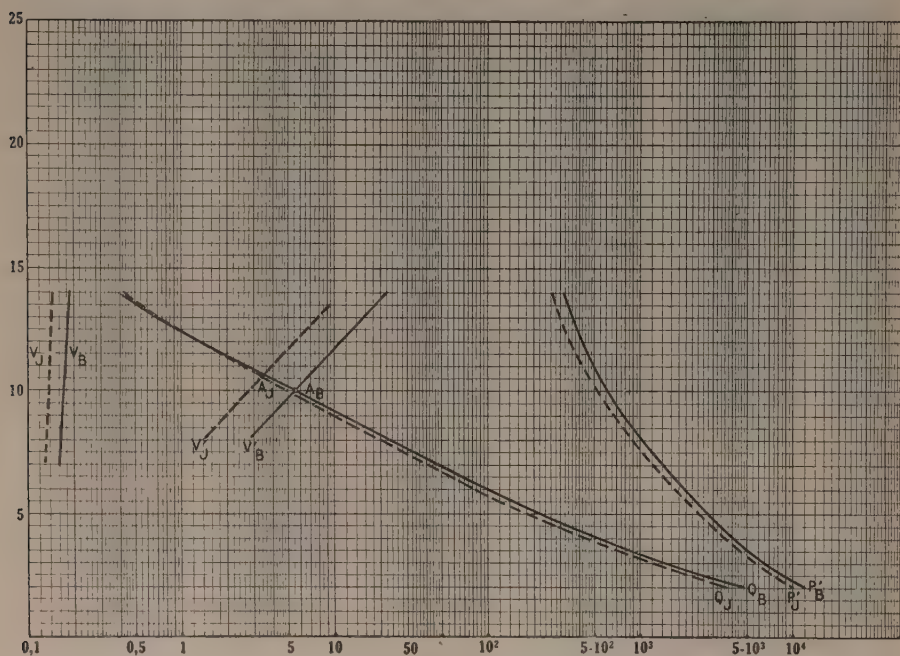


Fig.3.— Les courbes P'_B et P'_J représentent en fonction de la distance les éclairagements produits sur un test, en lumière blanche et en lumière jaune, par un projecteur d'automobile ; les courbes V_B et V_J , les éclairagements maximum nécessaires à la perception de ce test, en lumière blanche et en lumière jaune, au travers d'une atmosphère limpide. Les courbes Q_J , Q_B et V'_J , V'_B représentent celles relatives au brouillard artificiel. Les éclairagements sont exprimés en lux et sont portés en abscisses (échelle logarithmique) ; les distances sont exprimées en mètres et sont portées en ordonnées (d'après Mouton).

physiologiques qu'elle produit, notamment les variations de l'acuité visuelle. Il poursuit son étude en recherchant, tant en lumière blanche qu'en lumière jaune, l'éclairément minimum nécessaire à la perception d'un test gris sur fond noir en fonction de la distance d'observation.

(1) M. Mouton. — Thèse, Caen 1935.

En atmosphère limpide, il constate que cet éclairement E est donnée par la relation

$$\text{Log } E = A d + C, \quad (11)$$

d étant la distance du test à l'observateur, A et C des constantes dépendant de l'observateur, de la nature de l'atmosphère et de la lumière utilisée.

MOUTON relate ensuite les expériences de visibilité qu'il a effectuées au travers d'un brouillard artificiel de vapeur d'eau dans une pièce de 30 mètres de longueur et de 15 mètres de largeur.

Il détermine en fonction de la distance l'éclairement produit par un projecteur et l'éclairement minimum nécessaire à la perception du test.

L'auteur a trouvé que la modification apportée par le brouillard aux courbes d'éclairement du projecteur est sensiblement la même en lumière blanche qu'en lumière jaune; par contre la modification des courbes de perceptibilité (éclairement minimum nécessaire à la perception) est nettement plus accentuée en lumière blanche qu'en jaune (fig. 3). Ce résultat serait dû au fait que la valeur du contraste, qui dépend de la brillance des gouttelettes de brouillard, est moins affectée en lumière jaune qu'en lumière blanche.

III. - Transparence des brouillards naturels.

Les expériences auxquelles se sont livrés GRANATH et HULBURT ⁽¹⁾ ont été entreprises dans la baie du Potomac, à proximité de l'Océan Atlantique, de telle sorte que les résultats obtenus sont susceptibles d'être étendus aux brouillards marins.

L'émetteur comportait un miroir métallique, une lampe électrique à incandescence et des écrans colorés transmettant des bandes spectrales. Le récepteur était un miroir métallique au foyer duquel était placée une pile thermo-électrique.

(1) L. P. Granath et E. O. Hulburt. — Phys. Rev., vol. 34, p. 140, 1929.

Les mesures ont montré, disent les auteurs, qu'une lumière rouge n'est pas supérieure à une lumière bleue pour la pénétration dans le brouillard.

Au travers d'un brouillard épais, les distances nécessaires pour réduire la lumière à $1/1000^e$ de sa valeur initiale, ont été de 1,400 kilomètre pour la lumière de longueur d'onde 6 500 Angströms et de 1,200 kilomètre pour la lumière de longueur d'onde 4 500 Angströms; les distances nécessaires pour réduire la lumière à $1/100^e$ de sa valeur initiale ont été respectivement de 0,925 kilomètre et de 0,800 kilomètre.

Au cours de la discussion qui fait suite aux analyses, cette interprétation des mesures sera discutée. Indiquons cependant ici que GRANATH et HULBURT reconnaissent que leurs mesures s'appliquent uniquement au facteur de transmission et qu'elles n'apportent pas de réponse quant à la visibilité des objets et à l'avantage qui résulterait de l'emploi d'une lumière rouge ou d'une lumière bleue.

Ils ajoutent qu'une étude complète devrait tenir compte, notamment de la sensibilité de l'œil aux diverses radiations et du contraste des objets avec le fond sur lequel ils se détachent.

Ils précisent que les résultats de leurs expériences, qui ont été faites dans des brouillards épais, ne sauraient être généralisés pour donner des renseignements applicables aux brumes légères ou très légères, l'absorption des radiations bleues étant plus prononcée dans les brumes que dans les brouillards.

Ils signalent encore que le degré hygrométrique de l'air intervient d'une façon notable sur la transparence de l'atmosphère quoiqu'aucune étude n'ait été entreprise à ce sujet.

FOITZIK ⁽¹⁾ a réalisé un dispositif destiné à la mesure du coefficient de transparence des brouillards naturels. Un faisceau lumineux était dirigé sur un miroir disposé à 100 mètres de distance, puis réfléchi vers le point de départ, où il était concentré sur un verre dépoli. Une partie du faisceau incident était projetée sur un autre verre dépoli. L'égalisation de l'éclairement de ces deux verres se faisait au moyen d'un coin neutre.

(1) L. Foitzik. — Die Naturwissensch., t. 22, p. 384, 1934.

Les mesures ont été faites en plaçant devant l'oculaire du photomètre trois écrans colorés transmettant des bandes spectrales de longueur d'onde 4 830, 5 650 et 6 570 Angströms.

Les résultats de nombreuses expériences lui ont montré que, dans les brouillards caractérisés par des distances de visibilité ⁽¹⁾ inférieures à 0,8 kilomètre, les coefficients de transparence pour les radiations ci-dessus ne diffèrent pas sensiblement ; au contraire, dans les brouillards caractérisés par des distances de visibilité supérieure à 1 kilomètre, les coefficients de transparence peuvent différer entre eux de plus de 30 % et sont toujours plus grands pour la lumière bleue que pour la lumière rouge.

Pour expliquer cette discontinuité FOITZIK a été conduit à émettre l'hypothèse de l'existence de deux variétés de brouillard.

Lorsque la visibilité est inférieure à 1 kilomètre, le brouillard serait formé de grosses gouttelettes et diffuserait également toutes les radiations ; lorsque la visibilité est supérieure à 1 kilomètre, le brouillard serait formé de petites gouttelettes et diffuserait beaucoup plus les radiations bleues que les radiations rouges.

Il mentionne les travaux de BORN, DZIOBECK et WOLFF ⁽²⁾, qui ont trouvé, à Berlin, dans un brouillard correspondant à une distance de visibilité de 0,3 kilomètre, un coefficient de transparence pour la longueur d'onde 4 830 Angströms de 5 à 6 % supérieur à celui pour la longueur d'onde 6 570 Angstroms.

Il rappelle que GRANATH et HULBURT ⁽³⁾ ont trouvé à Washington, dans un brouillard correspondant à une distance de visibilité de 0,8 kilomètre, une valeur du facteur de transmission de 10 à 11 % plus élevée en rouge qu'en bleu.

(1) Foitzik a défini la distance de visibilité comme étant celle à laquelle un test noir éclairé d'une certaine manière cesse d'être perçu.

(2) Born, Dziobeck et Wolff. — Zeits. für Techn. Phys., t. 14, p. 289, 1933.

(3) Granath et Hulburt. — Loc. cit.

IV. - Transparence des atmosphères brumeuses ou limpides.

BENFORD ⁽¹⁾ a constaté que, par atmosphère claire ou par atmosphère légèrement brumeuse, les radiations violettes et bleues sont toujours plus dispersées que les autres radiations, mais selon une loi différente de celle de Lord RAYLEIGH.

LINK et HUGON ⁽²⁾ ont mesuré l'absorption atmosphérique par la variation de l'éclairement produit par une source sur un écran normal au rayon incident.

En appliquant la formule

$$E = \frac{I_0}{x^2} e^{-kx}$$

à deux stations d'observation, en ligne droite avec la source, aux distances x_1 et x_2 , un calcul simple donne la relation

$$\text{Log } \tau = k (x_1 - x_2) = \text{Log } \frac{E_2}{E_1} - 2 \text{Log } \frac{x_1}{x_2} ,$$

dans laquelle τ est le facteur de transmission entre les points x_1 et x_2 .

La source lumineuse était placée à l'observatoire du Pic du Midi (2 860 mètres d'altitude). La première station d'observation était au Col de Sencours (2 804 mètres d'altitude) à 900 mètres environ de l'Observatoire; la seconde était à la Brèche de Roland, à 31 kilomètres de l'Observatoire (2 804 mètres d'altitude).

LINK et HUGON, opérant dans trois régions spectrales délimitées à l'aide de filtres Wratten, ont obtenu notamment les résultats suivants :

Longueur d'onde	4 600 Å	5 250 Å	6 300 Å
Facteur de transmission	0,56	0,70	0,78

Dans tous les cas, ils ont constaté que le facteur de transmission augmente avec la longueur d'onde, mais moins rapidement que la quatrième puissance.

(1) F. Benford. — Gen. Elec. Rev., t. 29, p. 879, 1926.

(2) Link et Hugon. — Compt. rend. Acad. des Scien., t. 190, p. 810, 1930.

BUISSON, JAUSSEMAN et ROUARD ⁽¹⁾ ont également étudié de façon très précise l'absorption de l'atmosphère. Ils utilisaient une lampe à arc dans la vapeur de mercure et deux spectrographes respectivement distants de la source lumineuse de 600 et de 2 500 mètres. Les deux moitiés d'une plaque photographique étaient placées chacune dans un spectrographe et les temps de poses étaient égaux et simultanés.

Afin que les éclaircissements fussent sensiblement les mêmes sur les deux spectrographes, un écran absorbant, dont on avait préalablement déterminé la courbe d'absorption spectrale, était placé devant le premier spectrographe.

Les mesures ont été faites en octobre 1929 et mars 1930 dans la Vallée de l'Ouvèze à une altitude de 300 mètres.

Par atmosphère claire, le facteur de transmission kilométrique, déterminé sur la distance de 1 900 mètres, est donné pour les radiations visibles par le tableau suivant :

Longueur d'onde Angströms	Facteur de transmission kilométrique
5 780	0,925
5 461	0,925
4 358	0,910
4 046	0,905
3 910	0,898

Ces résultats indiquent que, même dans le spectre visible, l'absorption croît lorsque la longueur d'onde diminue.

Des mesures ont été reprises par un léger brouillard et les valeurs du facteur de transmission ont été trouvées inférieures aux précédentes d'une quantité sensiblement constante pour les diverses longueurs d'onde.

POKROWSKI ⁽²⁾ rappelle que la lumière est diffusée symétriquement en avant et en arrière par une particule de dimen-

(1) H. Buisson, G. Jausseran et P. Rouard. — Compt. rend. Acad. des Scien., t. 190, p. 808, 1930.

(2) G. I. Pokrowski. — Zeits. für Phys., t. 34, p. 49, 1925.

sion petite comparée à la longueur d'onde et que, lorsque la particule est de grande dimension, la lumière diffusée est d'autant plus importante qu'on se rapproche de la direction des rayons incidents ; en d'autres termes, l'intensité de la lumière diffusée décroît rapidement dans les directions qui s'écartent de la direction d'incidence.

En mesurant la luminosité du ciel clair dans différentes directions, POKROWSKI a constaté que la répartition de l'intensité de la lumière diffusée correspondait sensiblement à celle indiquée par MIE. Il attribue ce résultat à la présence dans l'atmosphère de particules de dimensions importantes.

Cet auteur a essayé de vérifier la loi de RAYLEIGH et a constaté que celle-ci n'était pas applicable à l'atmosphère limpide qu'il a expérimentée. En effet, la valeur du rapport

$\frac{k_{\text{bleu}}}{k_{\text{rouge}}}$ a varié de 1 à 2,15 dans des directions d'observation faisant avec la direction de la lumière incidente des angles de 2 à 60 degrés.

Or, si la loi de Lord RAYLEIGH était applicable, ce rapport serait égal à $\frac{\lambda^4_{\text{rouge}}}{\lambda^4_{\text{bleu}}}$ et aurait dû avoir 4,6 pour valeur, les longueurs d'onde utilisées étant 6 660 et 4 550 Angstroms.

KARRER et TYNDALL ⁽¹⁾ déterminent le rapport du facteur de transmission pour chacune des radiations du spectre au facteur de transmission pour la radiation de longueur d'onde 5 400 Angströms choisie arbitrairement.

Ils comparent à l'aide d'un spectrophotomètre l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence à celle de son image réfléchiée par un miroir distant de 50 ou de 600 mètres selon que l'atmosphère était brumeuse ou limpide.

Ils ont obtenu les résultats suivants :

1° par temps nuageux et humide, la transparence relative de l'atmosphère augmente régulièrement avec la longueur d'onde jusqu'à 5 400 Angströms et passe ensuite par deux maximum

(1) E. Karrer et E. Tyndall. — Bull. of the Bur. of Stand. Vol. 16, p. 377, 1920.

situés, le premier vers 5 800 Angströms et le second vers 6 600 Angströms ;

2° par temps pluvieux, les courbes accusent des valeurs absolues plus élevées et passent par un maximum vers 6 400 Angströms.

Les auteurs concluent que l'effet le plus remarquable de la pluie dans l'atmosphère est d'augmenter la transparence relative pour les radiations jaunes et orangées du spectre et signalent la diminution rapide de la transparence après cessation de la pluie, phénomène qu'ils expliquent par l'accumulation de fines particules d'eau sous forme de léger brouillard.

J. DUCLAUX ⁽¹⁾ a effectué en plein jour la mesure du coefficient de transparence d'atmosphères limpides ou légèrement brumeuses.

D'après l'auteur, ce coefficient ne varie jamais en raison inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde, mais suivant une puissance d'autant plus petite que la transparence est plus grande. Il explique ce fait en admettant que l'air le plus pur est celui qui contient les plus grosses particules.

DUCLAUX déclare que la loi théorique de RAYLEIGH est sans valeur pratique et essaie de tirer de ses résultats une loi de variation du coefficient de transparence.

Si l'on admet, dit-il, que la diffusion moléculaire se fait quantitativement suivant la loi de RAYLEIGH, le coefficient de transparence de l'atmosphère est la somme d'au moins trois termes, en plus de celui qui correspond à cette diffusion moléculaire. On aurait dans ce cas :

$$k = A \lambda^{-4} + B \lambda^0 + C \lambda^{-m} + D \lambda^{-n}, \quad (12)$$

avec $m \geq 3,5$ et $n \leq 1,5$.

Le premier de ces trois derniers termes correspondrait à une brume blanche non sélective, les deux autres à deux brumes

(1) J. Duclaux. — Journ. de Phys., t. 6, p. 401, 1935.

déterminées, l'une bleue, l'autre bleuâtre dont l'absorption va en croissant du rouge au violet.

V. - Visibilité au travers des brouillards naturels.

MUNSTER ⁽¹⁾ a déterminé le contraste entre deux tests éclairés par un appareil de projection réglé de façon que l'angle de divergence du faisceau fût comparable à celui des projecteurs d'automobiles.

Les tests étaient constitués par deux panneaux, l'un blanc, l'autre gris, dont les facteurs de réflexion étaient de l'ordre de 0,8 et de 0,2.

Un téléphotomètre, placé à proximité de l'appareil de projection, permettait de déterminer la brillance apparente des deux tests au travers du brouillard.

De nombreuses précautions étaient prises pour accroître la précision des mesures. Afin que les plages photométriques eussent la même couleur, la lampe tare du téléphotomètre était identique à celle de l'appareil de projection ; l'influence des variations de tension de la source de courant était supprimée en alimentant les deux lampes en parallèle.

Différents écrans colorés étaient successivement placés devant l'oculaire du téléphotomètre.

Les mesures ont été faites dans la Vallée de la Saale.

MUNSTER a constaté que, sur une distance de 50 mètres, le contraste était augmenté, par rapport à celui mesuré en lumière blanche, de 20 à 30 % avec un écran rouge, de 10 à 20 % avec un écran jaune et de 3 à 10 % avec un écran bleu.

Comparant ces résultats avec les observations faites par les usagers de l'automobile, MUNSTER pense, qu'en plus de l'augmentation de contraste, il existe un important effet physiologique dû à la couleur de la lumière utilisée.

VAN HEEL et VAN SOEST ⁽²⁾ ont essayé un certain nombre de projecteurs d'automobiles devant lesquels pouvaient être

(1) C. Munster. — Zeits. für Techn. Phys., année 1933 p. 78.

(2) A. C. S. Van Heel et J. L. Van Soest. — De Ingénieur, 1935.

placés des écrans jaunes et ont adopté, pour caractériser l'aptitude de chaque projecteur à être utilisé dans le brouillard, la distance à laquelle un test était perceptible.

Ce test, constitué par un fond noir sur lequel se trouvaient des taches grises irrégulières, était monté sur un chariot qui pouvait être déplacé devant le projecteur.

Le projecteur examiné était disposé à 0,75 mètre au-dessus du sol, de façon que le faisceau fût horizontal ou légèrement incliné. L'œil de l'observateur était placé à 1,50 mètre au-dessus du sol et à 1 mètre en arrière du projecteur.

La distance entre le projecteur et le test étant seulement de 55 mètres par suite de la disposition du terrain d'expériences, il n'a pas été possible aux auteurs d'effectuer des mesures dans des brouillards légers.

Les observations de VAN HEEL et de VAN SOEST ont été résumées dans des graphiques obtenus en portant en ordonnées la distance à laquelle le test était perceptible en lumière colorée et en abscisses la distance à laquelle le même test était perceptible en lumière blanche pour un projecteur déterminé.

Les auteurs n'ont jamais constaté d'augmentation de la distance de perceptibilité du test en plaçant un écran jaune devant le projecteur. Ils concluent que seul l'emploi d'un projecteur à coupure nette, placé très bas, augmente la distance de perceptibilité et que les avantages résultant de l'emploi de projecteurs d'automobiles à lumière jaune doivent être attribués, non pas à des facteurs physiques, mais à des causes physiologiques.

Comparant les résultats numériques obtenus par divers auteurs, BENNETT ⁽¹⁾ conclut que le facteur de transmission augmente toujours avec la longueur d'onde jusqu'à 6 500 Angströms.

Par temps clair, le facteur de transmission croît proportionnellement à la longueur d'onde; par temps de brouillard, l'augmentation du facteur de transmission avec la longueur d'onde est relativement faible et l'est d'autant plus que les dimensions des gouttelettes sont plus grandes.

(1) G. Bennett. — The Illum. Eng., t. 26, p. 75, 1933.

BENNETT admet comme un fait d'observation courante que la lumière blanche, après diffusion, est bleuâtre dans une brume légère et n'est jamais colorée dans un brouillard épais.

Appliquant ces données au problème de la visibilité, BENNETT indique que si toutes les longueurs d'onde au-dessous de 5 250 Angströms étaient supprimées de la lumière d'une source ayant une température de couleur de 3 000 degrés absolus, la lumière paraîtrait jaune foncé, l'intensité lumineuse serait réduite de 13 % et la distance de perceptibilité seulement de 2 %, en supposant que toutes les longueurs d'onde soient également transmises. En fait la plupart des radiations de courte longueur d'onde étant supprimées avant qu'elles n'atteignent l'observateur, la distance de perceptibilité ne serait réduite que de 0,4 %.

BENNETT montre que si l'on supprimait du faisceau d'un projecteur d'automobile les radiations de courte longueur d'onde, la perceptibilité serait faiblement modifiée, mais comme la proportion de lumière transmise par rapport à la lumière diffusée aurait augmenté, le contraste de l'objet serait plus grand.

STILES ⁽¹⁾ s'est proposé de rechercher si l'interposition d'un écran coloré améliore l'efficacité des projecteurs d'automobiles dans le brouillard et si l'amélioration éventuelle était due au changement de la couleur, à la réduction de l'intensité lumineuse ou à l'action simultanée de ces deux causes.

STILES a déterminé la distance de perceptibilité d'un test pour un observateur placé dans la position d'un conducteur d'automobile.

Les essais ont été effectués à l'aide de deux projecteurs disposés de la même façon que sur une automobile ; ces projecteurs comportaient un miroir parabolique et une glace légèrement diffusante permettant d'obtenir une divergence d'environ 7°.

Les tests étaient des disques recouverts de peinture grise plus ou moins foncée ; ils faisaient avec l'axe du faisceau un angle de 45°, afin d'éliminer la réflexion spéculaire vers l'œil de l'observateur.

(1) Stiles. — Rapport du Comité National de l'Eclairage de Grande-Bretagne. Session de la Commission Internationale de l'Eclairage, Berlin 1935; *The Illumin. Eng.* t. 28, p. 125, 1935.

La limite de perceptibilité d'un test était déterminée en plaçant celui-ci à différentes distances du projecteur, les déplacements étant effectués à l'insu de l'observateur. STILES indique que cinq à dix déplacements permettaient de fixer avec une précision suffisante la distance de perceptibilité.

Les écrans colorés ou neutres, étaient pour des raisons de commodité, placés devant les yeux de l'observateur.

Les facteurs de transmission de ces écrans colorés et neutres sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Dénomination des écrans	Facteur de transmission
Orangé léger	0,52
Orangé foncé	0,38
Rouge	0,24
Bleu-vert	0,06
Neutre A	0,455
Neutre B	0,20
Neutre C	0,08
Neutre D	0,046

Les facteurs de réflexion des tests neutres sont donnés dans le tableau suivant :

Dénomination des tests	Facteur de réflexion
0	0,80
4	0,40
2	0,14
5	0,08
6	0,08
7	0,05

STILES définit le brouillard par son facteur de transmission déterminé en visant, à l'aide d'un téléphotomètre, une lampe électrique à ampoule opaline placée à proximité du projecteur.

Afin d'éliminer la lumière transmise par diffusion, l'auteur effectuait une mesure correctrice en visant, non plus la lampe, mais ses abords immédiats.

STILES rapporte que ses expériences ont été faites au cours de six nuits, et que les mesures ont été effectuées par un seul observateur, en l'occurrence l'auteur, celui-ci ayant estimé que les résultats obtenus en grand nombre par un seul observateur étaient préférables à ceux obtenus en moins grand nombre par plusieurs observateurs.

En portant en abscisses le logarithme du facteur de transmission des écrans et en ordonnées la distance relative de perceptibilité d'un test déterminé, les points qui correspondent aux divers écrans successivement placés devant les yeux de l'observateur se trouvent situés sensiblement sur une droite (fig. 4).

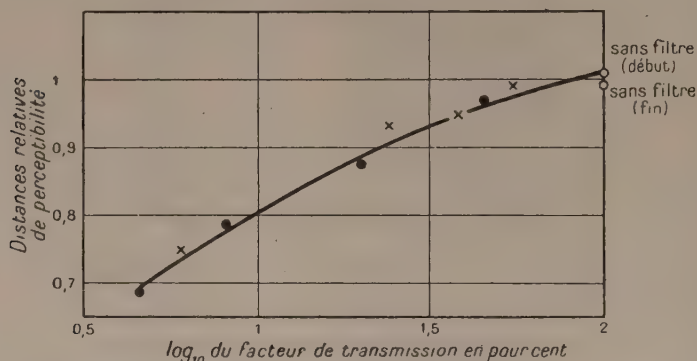


Fig. 4. — Courbe de la distance relative de perceptibilité d'un test à travers un écran donné en fonction du logarithme du facteur de transmission de cet écran. La distance relative de perceptibilité est le rapport de la distance de perceptibilité à travers un écran neutre ou coloré à la distance de perceptibilité sans écran. Les cercles blancs se rapportent aux mesures faites sans écran, les cercles noirs aux mesures faites avec des écrans neutres, les croix à celles faites avec des écrans colorés (d'après Stiles).

Toutefois au cours d'autres essais durant lesquels le brouillard était léger, STILES a constaté que la distance de perceptibilité pour l'écran orangé foncé était de 3 % supérieure à celle relevée pour l'écran neutre A.

L'auteur a tenu compte de la variation de l'opacité du brouillard au cours de chaque expérience et il a corrigé les distances de perceptibilité relevées à un moment donné d'après la formule

$$\log d - \log d_0 = k (\log \tau - \log \tau_0), \quad (13)$$

dans laquelle τ représente le facteur de transmission du brouil-

lard à un moment déterminé, τ_0 le facteur de transmission moyen pendant la durée de l'expérience, d la distance de perceptibilité enregistrée et d_0 la distance de perceptibilité corrigée.

L'auteur étudie ensuite le coefficient de transparence du brouillard pour la lumière blanche et les lumières colorées.

Il constate que les brouillards épais n'exercent pas d'influence sélective appréciable, mais que la transparence des brouillards légers est accrue lorsque sont interposés des écrans rouges ou orangés.

Le tableau ci-après reproduit les valeurs du rapport $\frac{k_{\text{coloré}}}{k_{\text{blanc}}}$ pour cinq brouillards définis par le logarithme décimal de leur facteur de transmission déterminé en lumière blanche sur une distance de 100 pieds ; nous avons mentionné à titre indicatif le coefficient de transparence kilométrique correspondant.

$\log \tau_{\text{blanc}}$	k_{blanc}	$\frac{k_{\text{coloré}}}{k_{\text{blanc}}}$			
		rouge	orangé foncé	orangé léger	bleu
1,94	4,54	0,79	0,95	0,85	1,08
1,91	6,80	0,85	0,79	0,71	0,97
1,45	41,5	0,97	1,04	0,97	1,01
2,24	135,5	1,00	0,99	1,01	1,01
4,00	302	1,06	1,02	1,02	1,02

L'auteur termine en comparant les propriétés de transmission des filtres colorés utilisés au cours de ses expériences relativement à ceux que l'on trouve dans le commerce et admet que les modifications de la distance de perceptibilité provenant de l'emploi des écrans qu'il a utilisés sont trop faibles pour que l'on puisse envisager des améliorations plus nettes à l'aide des écrans du commerce.

STILES conclut que dans les brouillards, à intensité lumineuse égale, les distances de perceptibilité de tests éclairés par des projecteurs d'automobiles sont les mêmes en lumière blanche et en lumière colorée quelconque.

VI. - Visibilité au travers d'atmosphères brumeuses ou limpides.

ROCARD et DE ROTSCCHILD ⁽¹⁾ ont établi, en partant de la théorie électromagnétique de la lumière, des formules permettant de calculer la brillance de l'atmosphère.

Leurs calculs sont basés sur les hypothèses suivantes :

1° la diffusion de la lumière incidente est faible et la diffusion de la lumière diffusée est négligeable ;

2° les particules diffusantes sont petites devant la longueur d'onde de la lumière incidente, hypothèse vérifiée par l'expérience, selon les auteurs, lorsque le facteur de transmission kilométrique est compris entre 0,80 et 0,95 ;

3° les intensités lumineuses diffusées par chaque particule s'ajoutent séparément.

Les auteurs ont indiqué que le coefficient de transparence moyen d'une atmosphère donnée pour une lumière complexe donnée, est pratiquement le coefficient de transparence de cette atmosphère pour la radiation de luminosité maximum de cette lumière.

ROCARD et DE ROTSCCHILD étudient la visibilité des objets éclairés par un faisceau de projecteur et définissent le contraste par le rapport entre la brillance de l'objet examiné et la brillance atmosphérique parasite. Cette brillance parasite est celle de la portion d'atmosphère comprise entre le projecteur et l'objet ; elle peut être mesurée en disposant un fond noir près de l'objet.

REY ⁽²⁾ d'une part, RIVIÈRE et ROCARD ⁽³⁾ d'autre part, ont établi des formules s'appliquant à la vision, à l'œil nu ou à la

(1) Y. Rocard et P. de Rothschild. — Bulletin N° 45 du Service Technique et Industriel de l'Aéronautique, Paris 1928.

(2) J. Rey. — De la portée des Projecteurs, Paris 1915.

(3) J. Rivière et Y. Rocard. — Etude sur la visibilité, Paris 1935.

jumelle, d'objets très éloignés au travers d'atmosphères brumeuses ou limpides.

Les auteurs ne tiennent pas compte de la composition spectrale de la lumière, aussi nous n'insisterons pas sur leurs travaux qui s'écartent de la présente étude.

VII. - Discussion des études.

Je me propose d'expliquer les divergences qui ont été relevées dans les travaux analysés.

LORD RAYLEIGH a montré que si l'on suppose la concentration particulière très faible et le diamètre des particules très petit devant la longueur d'onde, l'intensité de la lumière diffusée est égale dans toutes les directions et proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde, les radiations bleues étant en conséquence plus diffusées que les radiations rouges.

Les travaux de MIE aboutissent à des formules qui, sans aucune restriction, peuvent s'appliquer à tous les phénomènes dispersifs d'origine particulière. Ils montrent que l'intensité de la lumière diffusée est une fonction complexe, non seulement

du rapport $\frac{d}{\lambda}$ mais encore du rapport $\frac{m d}{\lambda}$; que, dans

le cas particulier de sphérules diélectriques incolores de grandes dimensions, la lumière diffusée par le milieu trouble est blanche; et que, pour un indice de réfraction relatif égal à celui de l'eau par rapport à l'air, la lumière est toujours plus diffusée dans la direction du rayon incident que dans la direction opposée.

BLUMER calculant à partir des formules de MIE l'intensité de la lumière diffusée par des sphérules de diamètre compris entre 0,2 et 1 micron a trouvé que la radiation rouge 6 500 Angströms est moins diffusée que la radiation verte 5 200 Angströms dans la direction du rayon incident mais qu'elle est plus diffusée que cette dernière dans la direction opposée à celle du rayon incident.

BOUTARIC d'une part et CHENEVEAU et AUDUBERT d'autre part remplacent l'exposant 4 de la formule de RAYLEIGH par un exposant n fonction du nombre et du diamètre des particules. Les expériences qu'ils ont faites indiquent que pour des précipités très fins, l'exposant de la formule pouvait être égal à $+4$, étendant ainsi à des précipités cristallins la formule établie par RAYLEIGH dans le cas de la diffusion moléculaire; elles ont permis de vérifier que, dans le cas de concentration importante de particules de grandes dimensions, les radiations bleues pouvaient être moins diffusées que les radiations rouges, ce qui ressort de la théorie de MIE.

Les travaux expérimentaux entrepris sur les brouillards d'eau conduisent-ils à des conclusions analogues ? Il y a lieu tout d'abord d'établir une distinction entre ceux qui ont été effectués sur les brouillards artificiels et ceux qui se rapportent aux brouillards naturels.

POKROWSKY a vérifié sur des brouillards artificiels les théories générales de la lumière diffusée, mais RUDOLPH a trouvé que les radiations de courte longueur d'onde seraient moins diffusées que les radiations de grande longueur d'onde. Ces résultats en apparence contradictoires ne le sont pas en fait, car les brouillards expérimentés par RUDOLPH étaient anormalement opaques, leur facteur de transmission métrique étant de 0,02.

Dans le même ordre d'idées BORN et FRANZ, étudiant des brouillards formés de particules d'un diamètre de 6 microns, ont constaté que les radiations sont également diffusées à l'exception des radiations rouges qui le sont davantage, certainement en raison de la forte concentration particulière de ces brouillards.

Le minimum de transmission constaté par ANDERSON dans le spectre visible s'explique moins facilement ; sa conclusion est contraire à celle de HOUGHTON qui trouve un maximum de transmission pour la radiation 4 900 Angströms et à celle d'UTTERBACK pour lequel le maximum serait à 5 600 Angströms environ.

Nous ne possédons malheureusement pas de précision suffisante sur la nature physique des brouillards artificiels expé-

mentés par certains auteurs, notamment de données numériques sur leur concentration particulière ; de plus, ces expérimentateurs n'ont pas suffisamment tenu compte, dans leurs mesures, de la lumière diffusée.

Les résultats obtenus dans les brouillards naturels sont moins discordants. En effet, GRANATH et HULBURT constatent que les radiations rouges sont un peu moins diffusées que les radiations bleues dans un brouillard naturel de facteur de transmission kilométrique de l'ordre de 0,01, brouillard déjà très opaque mais cependant transparent comparativement aux brouillards artificiels dont il était question précédemment.

Des résultats comparables ont été enregistrés sur de grandes distances par BENFORD, puis par FOITZIK qui trouvent que le facteur de transmission est plus élevé pour les radiations rouges que pour les radiations bleues.

La moindre diffusion des radiations de grande longueur d'onde par les brumes légères est encore signalée par POKROWSKY, ROCARD et DE ROTSCILD, LINK et HUGON, BUISSON, JAUSERAND et ROUARD, et DUCLAUX.

BENNETT indique toutefois que l'amélioration est plus marquée dans les brouillards légers, et KARRER et TYNDALL en cas de temps pluvieux.

Les différences entre les résultats obtenus dans les brouillards naturels et dans les brouillards artificiels peuvent s'expliquer par le fait que tous les brouillards artificiels étudiés étaient de grande opacité, c'est-à-dire formés de particules grosses et nombreuses comme il est assez rare d'en constater dans les brouillards naturels. En effet, même dans les brouillards naturels les plus opaques, la masse d'eau condensée vis-à-vis de la masse d'eau vaporisée est toujours très faible, ce qui montre que dans ce cas, le nombre volumique de particules est petit comparé à celui des brouillards artificiels.

La saturation de l'atmosphère peut aussi influencer les résultats. En effet, l'atmosphère des brouillards artificiels n'est pas nécessairement saturée, car certains disparaissent spontanément avec la cause qui les produit. Ceci se comprend

aisément, étant donné la quantité considérable d'eau nécessaire à la saturation de l'atmosphère.

L'indice de réfraction variant probablement avec le degré de saturation de l'atmosphère ⁽¹⁾, une différence importante dans la saturation semble de nature à justifier les différences existant entre un brouillard naturel et un brouillard artificiel.

D'une façon générale on peut déduire de tous ces travaux que dans les brumes et les brouillards naturels les radiations de grande longueur d'onde sont presque toujours moins diffusées que les radiations de courte longueur d'onde.

MUNSTER a étudié l'influence du brouillard sur la valeur des contrastes pour différentes lumières; il enregistre une amélioration de 10 % en faveur d'une lumière jaune et de 20 % en faveur d'une lumière rouge. Cette autre façon d'envisager le problème présente un intérêt particulier, car elle tient compte de phénomènes physiologiques.

Les travaux de STILES n'indiquent pas d'amélioration de la visibilité par l'emploi de radiations de grande longueur d'onde.

Du point de vue purement physique, ses mesures du coefficient de transparence font ressortir une moindre dispersion des radiations de grande longueur d'onde dans les brouillards légers, le phénomène inverse ayant lieu pour les brouillards épais; de telles constatations viennent donc à l'appui des conclusions générales énoncées précédemment.

Il n'en est malheureusement plus de même lorsqu'on analyse ses expériences de visibilité dans lesquelles interviennent des phénomènes physiologiques. Les résultats numériques relatifs à la distance de perceptibilité ne permettent pas de tirer de conclusion.

La perceptibilité d'un test dépendant du seuil différentiel et variant avec chaque observateur selon sa visibilité et ses sensations colorées personnelles, il semble indispensable dans toute mesure de perceptibilité, de noter les résultats de plusieurs observateurs. Il est donc regrettable que STILES n'ait relevé

(1) L'observation courante permet d'ailleurs de remarquer que la visibilité par temps clair varie dans des proportions considérables avec l'état hygrométrique.

que les résultats d'un seul observateur. Il est possible que celui-ci était moins sensible aux radiations de grande longueur d'onde. MOUTON a signalé dans ses travaux avoir rencontré de tels sujets.

STILES n'a pas essayé d'écran jaune transmettant une lumière d'un très grand facteur de pureté ; il déclare simplement que l'on peut étendre à ces écrans jaunes les résultats qu'il a obtenus avec des écrans rouges. Cette opinion est contestable, car le seuil de perceptibilité différentielle en lumière jaune est très différent de celui en lumière rouge.

On peut admettre assez facilement que STILES, n'ait pas constaté d'amélioration de la visibilité dans les brouillards épais en faisant usage d'écrans jaunes, puisqu'il enregistre des coefficients de transparence plus élevés en lumière jaune qu'en lumière bleue ; par contre, dans les brouillards légers les résultats qu'il obtient, en opposition avec ceux de MUNSTER, peuvent être expliqués par les remarques que nous avons faites précédemment.

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES LUMIÈRES ET SUR LES ÉTATS ATMOSPHÉRIQUES

I. - Lumières colorées.

L'analyse, puis la discussion des différents travaux entrepris avant nos expériences, nous ont montré que dans de nombreux cas, les expérimentateurs n'avaient pas toujours défini avec exactitude la nature spectrale des lumières utilisées pour la détermination de la visibilité au travers des brumes et brouillards.

Il nous paraît utile, avant de préciser notre programme d'essais, de dire quelques mots sur les lumières colorées.

Chacune des lumières utilisées au cours de nos expériences a été caractérisée par la longueur d'onde de la radiation de luminosité maximum, la longueur d'onde de la radiation dominante et le facteur de pureté; toutes ces grandeurs dépendent de la température du filament incandescent.

Soient Λ la courbe de visibilité et R, V et B les courbes des sensations rouge, verte et bleue dans un spectre d'égale énergie; soient E la courbe spectrale du rayonnement du corps noir à la température de couleur du tungstène, τ la courbe spectrale de transmission d'une ampoule et ρ la courbe spectrale de réflexion d'un miroir.

Les produits $E_{\lambda} \tau_{\lambda} \rho_{\lambda}$ donnent la courbe d'énergie du rayonnement étudié; les produits $\Lambda_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \rho_{\lambda}$ donnent la courbe de luminosité de ce rayonnement; les produits $R_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \rho_{\lambda}$, $V_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \rho_{\lambda}$ et $B_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} \rho_{\lambda}$ donnent les courbes des sensations rouge, verte et bleue.

Les valeurs numériques des trois sensations résultantes sont données par les rapports

$$\frac{r}{r + v + b} \quad \frac{v}{r + v + b} \quad \frac{b}{r + v + b} ,$$

dans lesquels r , v et b représentent l'aire de chacune des courbes de sensation.

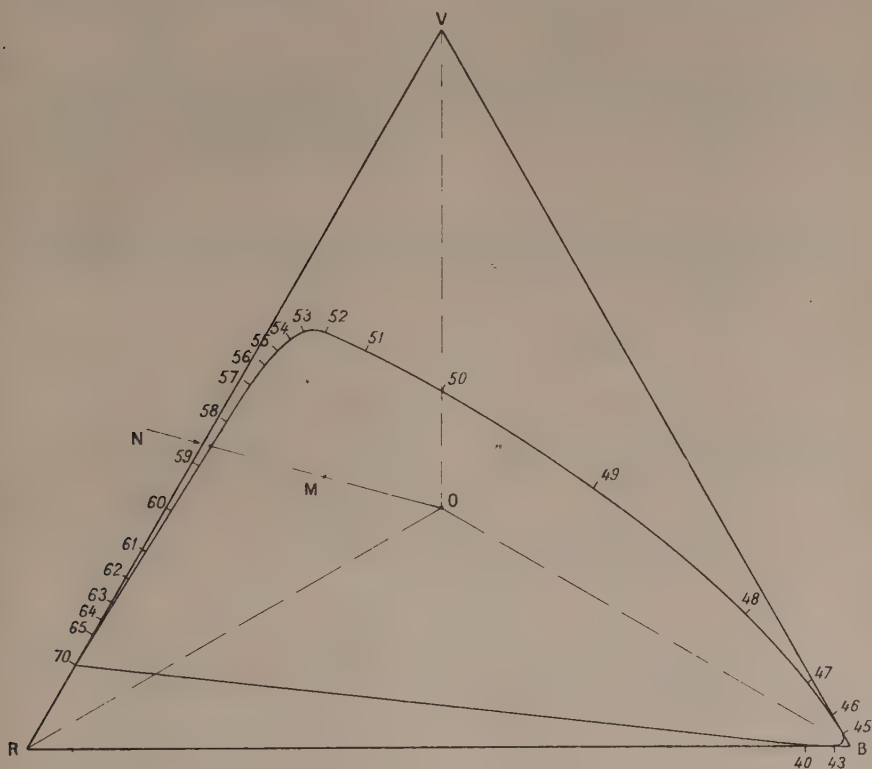


Fig. 5. — Triangle de Kœnig-Maxwell.

La construction de KœNIG-MAXWELL (fig. 5), permet de déterminer la couleur du rayonnement considéré.

Toute sensation colorée peut être représentée par un point M centre de gravité des trois masses r , v et b placées en chacun des sommets d'un triangle équilatéral. Le centre O

représente la lumière blanche produite par le corps noir à 5 000 degrés absolus (et non la lumière appelée blanche au cours de cet ouvrage qui est celle produite par le tungstène à la température de couleur de 2 850 degrés absolus).

Chaque radiation monochromatique, définie par les trois valeurs des sensations qu'elle produit sur l'œil, est représentée dans ce triangle par un point : l'ensemble des radiations l'est par une ligne continue.

Les trois rapports obtenus précédemment définissent un point M tel que la ligne OM coupe la courbe des radiations monochromatiques en un point N qui caractérise la longueur d'onde de la radiation dominante.

Le rayonnement complexe produit la même sensation de couleur qu'une lumière monochromatique de cette longueur d'onde à laquelle on ajouterait de la lumière blanche dans le rapport $\frac{O M}{O N}$ que l'on appelle le facteur de pureté.

Le facteur de transmission total d'un filtre pour un rayonnement déterminé, s'obtient en faisant le rapport

$$\tau = \frac{\sum_{4\,000}^{7\,000} \Lambda_{\lambda} E_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda}{\sum_{4\,000}^{7\,000} \Lambda_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda} \quad (14)$$

des aires des courbes de luminosité du rayonnement transmis et du rayonnement incident.

II. - États atmosphériques.

Les divergences de résultats obtenus par les auteurs dont nous venons d'analyser les travaux font ressortir l'intérêt qu'il y a de préciser non seulement les caractéristiques des lumières, mais aussi les conditions météorologiques dans lesquelles sont effectués les essais.

a) *Brouillards et brumes.*

Il nous paraît dès lors nécessaire d'exposer succinctement la formation et la constitution des brouillards.

L'air contient toujours une certaine quantité de vapeur d'eau qui peut former, en se condensant, soit une couche de buée sur les corps dont la température est très inférieure à celle de l'air, soit des nuages ou des brouillards.

On appelle humidité relative de l'atmosphère le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air à la masse maximum que ce volume d'air pourrait contenir à la même température.

Soient f la tension de la vapeur d'eau à la température t de l'air et F la tension maximum à cette température; l'humidité relative ou état hygrométrique de l'air est donné par le rapport $\frac{f}{F}$ qui se mesure au moyen d'un psychromètre.

On peut aussi déterminer directement la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume connu d'air en faisant passer cet air dans un tube desséchant. Toutefois, dans le cas d'une atmosphère de brouillard, la masse d'eau ainsi mesurée correspond à la masse totale d'eau existant dans l'atmosphère à l'état de vapeur et à l'état de gouttelettes.

D'après ANGOT ⁽¹⁾ la tension de vapeur d'eau dans l'atmosphère varie à la fois suivant le jour et suivant la saison.

En hiver, et en particulier en janvier, la tension de vapeur ne passe, dans le cours de la journée que par un seul minimum vers le lever du soleil et un seul maximum vers 14 heures.

En été, au contraire, on observe deux maximum et deux minimum les premiers ayant lieu vers 4 heures et vers 17 heures, les seconds vers 8 heures et 20 heures.

Cette oscillation double n'existerait que dans les stations

(1) A. Angot. — Traité élémentaire de Météorologie, Paris 1928.

où la variation de la température diurne est assez grande ; sur mer ou dans le voisinage immédiat des côtes on n'observerait qu'une oscillation simple.

La variation de l'humidité relative serait, d'après ANGOT, à peu près l'inverse de la variation de la température diurne.

Pendant l'hiver l'humidité relative est maximum le matin un peu avant le lever du soleil et elle diminue vers 14 heures pour augmenter, d'abord assez vite, puis plus lentement pendant la nuit. Pendant l'été, la variation affecte la même allure, mais elle est plus accusée.

On conçoit donc que ce soit la nuit, et plus particulièrement avant le lever du jour, que se produisent les brouillards.

Si l'on considère la variation annuelle de cette humidité relative, on constate que dans la région parisienne où la moyenne générale est 0,80, le minimum se produit en avril (0,69) et le maximum en décembre (0,90). C'est donc généralement pendant les mois de novembre, décembre et janvier qu'il y aura le plus facilement formation de brouillards.

En effet, la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère se condense à la suite d'un refroidissement suffisant qui peut se produire de trois manières différentes :

1° Par le rayonnement nocturne en l'absence de nuages ;

2° Par le passage d'une certaine masse d'air d'une région chaude à une région plus froide, ou d'une faible altitude à une altitude plus élevée ;

3° Par mélange de deux masses d'air saturées à température différente ; c'est ainsi qu'on explique la formation et la disparition brusques de certains nuages légers par temps découvert.

La vapeur ainsi condensée peut rester en suspension dans l'atmosphère sous forme de gouttelettes d'eau qui, groupées, constituent les nuages et les brouillards. Mais les brouillards et les nuages ne peuvent persister en atmosphère calme que si de nouvelles quantités de vapeur se condensent constamment pour remplacer les gouttelettes qui tombent et s'évaporent.

Il apparaît que le brouillard se produit chaque fois que l'humidité relative de l'atmosphère étant égale à l'unité, l'excès d'eau se condense en gouttelettes. Toutefois, selon M. BRAZIER, Directeur de l'Observatoire du Parc Saint-Maur, il y aurait lieu d'établir une différence entre les brouillards résultant de la saturation de l'atmosphère en vapeur d'eau et ceux produits en l'absence de saturation. Les premiers peuvent être enregistrés aussi bien en ville qu'à la campagne, mais les seconds ne s'observent que dans les régions voisines de centres industriels dont l'atmosphère est polluée.

Ces brouillards, dont certains correspondent à un état hygrométrique de 0,80, sont certainement dûs à la présence d'un nombre anormalement élevé de centres de condensation en suspension dans l'atmosphère, tels que poussières, fumées, ou particules hygroscopiques.

C'est ainsi que MM. BRAZIER et PERDEREAU, étudiant l'augmentation du total annuel des jours de brouillard notés à l'Observatoire du Parc Saint-Maur de 1874 à 1933, ont établi que cette augmentation est due à des causes locales ayant amené la multiplication de particules ténues, par suite notamment du développement de la circulation automobile dans la région où est situé l'Observatoire.

ALLIX ⁽¹⁾, signale que la région de Saint-Fons près de Lyon constitue un centre de brouillards de cette nature, par suite de la pollution de l'atmosphère.

On conçoit l'intérêt que présente l'étude de la visibilité dans le brouillard si l'on note les conditions météorologiques dans lesquelles on effectue les essais, la nature du lieu, la saison et l'heure, le nombre et le diamètre des particules de brouillard.

Les travaux entrepris sur la nature des brouillards naturels sont assez peu nombreux ; nous retiendrons ceux de HOUGHTON ⁽²⁾ relatifs à la dimension et à la répartition des gouttelettes.

(1) Allix. — Comptes rendus de l'Ac. des Sc., t. 193, p. 1301, 1932.

(2) H. G. Houghton. — Physics, vol. 2, p. 467, 1932.

L'auteur captait les gouttelettes sur une plaque de verre recouverte d'huile afin de limiter leur étalement et les photographiait.

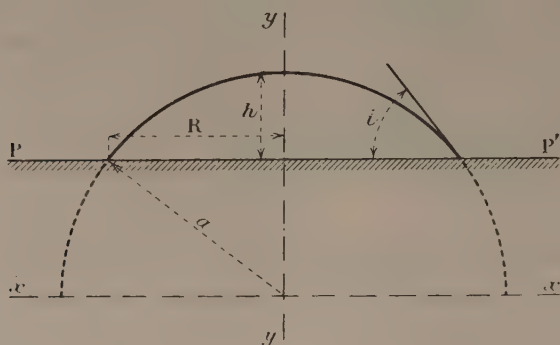


Fig. 6. — Schéma pour le calcul du rayon r d'une gouttelette à l'état libre en partant du rayon R de cette même gouttelette supposée étalée en forme de calotte sphérique sur le plan PP' et de l'angle i que fait la tangente à la gouttelette avec le plan PP' au point de contact.

Il a trouvé que le rayon r de la gouttelette à l'état libre est lié au rayon R de la gouttelette étalée (fig. 6) par la relation

$$r = 0,533 R. \quad (15)$$

L'examen d'un grand nombre de photographies lui a montré que les dimensions de ces particules sont essentiellement variables.

En classant les gouttelettes d'après leur diamètre, en un certain nombre de groupes, il a noté le nombre de gouttelettes entrant dans chacun de ces groupes, et a constaté qu'il existe toujours un maximum très marqué qui varie avec le temps dans le sens d'une augmentation du diamètre.

Ce court aperçu quant à l'étude du nombre et du diamètre des particules de brouillard montre que ce phénomène naturel varie rapidement dans sa nature physique. Il est très important d'opérer avec une extrême rapidité et de suivre l'évolution des gouttelettes au fur et à mesure que les expériences se déroulent.

b) Atmosphères brumeuses et limpides.

DUCLAUX ⁽¹⁾ caractérise la pureté d'une atmosphère par la distance à laquelle est vu, en plein jour et sans interposition de filtre devant l'œil, un obstacle naturel de grandes dimensions.

Dans l'atmosphère parfaitement pure des hautes altitudes, la distance de visibilité est de plusieurs centaines de kilomètres ; elle est toujours inférieure à quelques dizaines de kilomètres aux basses altitudes.

J. REY ⁽²⁾ indique qu'on peut distinguer trois sortes de temps : le "temps clair", le "temps moyen" et le "temps brumeux", cette dernière appellation ne s'appliquant pas à la brume véritable mais à une atmosphère moins transparente que l'atmosphère normale.

Alors que le "temps clair", le "temps moyen" et le "temps brumeux" peuvent être caractérisés par des facteurs de transmission kilométrique, les brumes et les brouillards ne peuvent être caractérisés que par des facteurs de transmission hectométrique, décamétrique ou même métrique.

D'après REY, la transparence de l'atmosphère dans les régions maritimes est toujours réduite par la présence d'humidité dans l'air.

Dans les régions continentales, l'air est généralement plus sec, mais renferme des poussières très absorbantes.

REY signale que par une belle soirée chaude et sèche, le facteur de transmission kilométrique de l'atmosphère parisienne n'est pas supérieur à 0,62.

En montagne, il faut atteindre l'altitude de 1 000 mètres pour observer de très grandes transparences ; le facteur de transmission kilométrique est, par temps sec, plus grand en hiver qu'en été ; il peut atteindre 0,97.

(1) J. Duclaux. — Compt. rend. des réunions de l'Inst. d'Opt., 2^e année, 1931.

(2) J. Rey. — Loc. cit.

REY a déterminé, pour les diverses régions climatiques de la France, les facteurs de transmission kilométriques moyens annuels correspondant à des taux de probabilité annuels :

Régions	Temps brumeux	Temps moyen	Temps clair
	Probabilité annuelle 90 %	Probabilité annuelle 50 %	Probabilité annuelle 10 %
Nord	0,644	0,900	0,962
Ouest	0,679	0,911	0,962
Sud-Ouest	0,721	0,917	0,962
Sud	0,879	0,932	0,964

Il a également déterminé pour l'ensemble du territoire les facteurs de transmission kilométriques moyens saisonniers correspondant à des taux de probabilité saisonniers :

Saisons	Temps brumeux	Temps moyen	Temps clair
	Probabilité saisonnière 90 %	Probabilité saisonnière 50 %	Probabilité saisonnière 10 %
Printemps	0,740	0,911	0,965
Été	0,766	0,913	0,965
Automne	0,727	0,917	0,953
Hiver	0,320	0,889	0,938

Sous le nom d' "état brumeux de l'atmosphère", Gabriel GUILBERT ⁽¹⁾ désigne toute atmosphère non limpide qui ne dépose pas d'humidité sur les objets.

(1) G. Guilbert. — Compt. rend. Acad. des Scien., t. 183, p. 427, 1926.

D'après cet auteur, l' "air brumeux" ne semble pas dépendre du degré hygrométrique ; il existe par temps sec ou par temps humide et se produit quels que soient le lieu, la saison et la température ; il est indifférent à l'agitation de l'air.

GUILBERT cite les résultats de mesures qu'il a effectuées en 1925 au Bourget : la visibilité était de 10 à 30 kilomètres par atmosphère limpide, le degré hygrométrique étant compris entre 0,80 et 0,94 ; elle était de 0,6 à 1,8 kilomètre par atmosphère brumeuse, le degré hygrométrique étant compris entre 0,89 et 0,96.

Les études précédentes montrent que l'atmosphère au niveau du sol n'est jamais parfaitement limpide, surtout à proximité des agglomérations urbaines.

CHAPITRE III

PROGRAMME D'ESSAIS

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURES

I. - Déterminations préliminaires en laboratoire.

a) Détermination des caractéristiques des lumières.

Il ressort des différents travaux analysés que, suivant la nature des atmosphères expérimentées, telle lumière paraît plus favorable que telle autre. C'est pourquoi, j'ai cru devoir essayer plusieurs lumières de composition spectrale différente, obtenues par absorption partielle ou totale de certaines radiations de la lumière émise par un filament de tungstène à la température de couleur de 2850 degrés absolus.

Mon choix s'est fixé sur les verres et métaux colorés suivants :

Nature des verres d'ampoule et des métaux de miroir	Couleur de la lumière transmise ou réfléchie
Verre au cobalt	bleue
Verre au sulfure de cadmium	jaune
Verre au sulfure de cadmium et de sélénium	orangée ou rouge
Or poli	jaune
Cuivre poli	orangée

Les mesures ont porté sur la détermination de la température du filament et sur la détermination des courbes spectrales de transmission des ampoules et de réflexion des miroirs, notamment des miroirs argentés dont on doit tenir compte de la sélectivité.

Nous avons admis la température moyenne de 2 850 degrés absolus à la suite de mesures de brillance effectuées sur le filament de lampes à ampoule incolore. Mesurant l'éclairement de l'image du filament projetée sur un écran diffusant au moyen d'une lentille achromatique, la brillance a été déduite de la formule

$$B = \frac{E p^2}{S \tau \tau'} \quad (16)$$

dans laquelle E est l'éclairement moyen de l'image mesuré sur la partie extérieure des spires, p la distance de l'image à la lentille, S la surface de la lentille, τ son facteur de transmission et τ' le facteur de transmission de l'ampoule. Les mesures étaient faites à l'aide du photomètre WAGUET, aménagé en microbrillancemètre.

La brillance ayant été trouvée de 1 200 bougies par centimètre carré, j'ai déduit des travaux de FORSYTHE et WORTHING ⁽¹⁾ que la température de couleur était égale à 2 850 degrés absolus.

La mesure des facteurs spectraux de réflexion des métaux et de transmission des ampoules a été faite au spectrophotomètre JOBIN et YVON modifié, dans ce but, selon les indications de M. WAGUET.

La détermination des facteurs de réflexion a été faite en lumière naturelle sous l'incidence de 45 degrés. Sur l'un des deux faisceaux était disposée, immédiatement après la lentille collimatrice, une plate-forme tournante (fig. 7) portant l'échantillon du métal à étudier et un prisme à réflexion totale dont on avait déterminé préalablement le facteur de transmission (0,89).

La détermination des facteurs de transmission a été faite en plaçant un fragment d'ampoule au foyer commun de deux lentilles de même longueur focale (fig. 8) choisie suffisamment

(1) Forsythe et Worthing. — Propriétés du tungstène et caractéristiques des lampes à incandescence, Rev. gén. de l'Electr., t. 20, p. 303 et 331, 1926.

grande pour que les rayons puissent être considérés comme normaux aux faces de l'échantillon. Cette disposition est nécessitée par le fait qu'une portion notable d'ampoule ne constitue

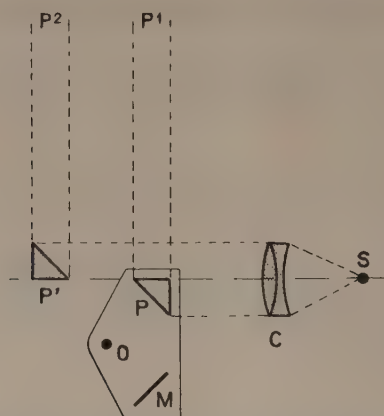


Fig. 7. — Schéma montrant la disposition de la plateforme tournante sur laquelle étaient disposés l'échantillon M de métal à étudier et le prisme P à réflexion totale.

pas une lame à faces parallèles, mais un ménisque susceptible de produire un déplacement du faisceau. La surface utile de verre n'excédait pas un millimètre carré.



Fig. 8. — Schéma du système optique utilisé dans le spectrophotomètre pour éviter le déplacement du faisceau à travers une lame de verre à faces non parallèles.

Si θ et θ_0 désignent les angles des sections principales des deux nicols à partir du croisement parfait lorsque le verre est ou n'est pas interposé, la densité d de ce verre est donnée par la relation

$$d = 2 (\text{colog } \sin \theta - \text{colog } \sin \theta_0). \quad (17)$$

b) Détermination des caractéristiques géométriques des lampes et des projecteurs.

Les caractéristiques géométriques des lampes utilisées pendant nos essais ont été mesurées à l'aide d'un appareil identique à celui utilisé au Laboratoire Central d'Electricité pour la vérification des lampes soumises à l'agrément ministériel ⁽¹⁾.

L'étude comparative des propriétés des lumières colorées ne peut être précise que si la répartition des intensités est la même pour chacune de ces lumières.

C'est dans un même projecteur que les diverses lampes à ampoule incolore ou colorée auraient dû être placées; mais afin d'accélérer les manipulations et d'éviter les erreurs provenant des variations rapides des conditions atmosphériques, j'ai préféré utiliser six projecteurs dont j'ai vérifié l'aberration longitudinale par la méthode photographique due à WAGUET, STAMPA et DOURGNON ⁽²⁾.

On obture le projecteur par un écran fixe E muni d'une fente radiale F (fig. 9); un deuxième écran E_1 , muni d'une fente F_1 en forme de spirale d'Archimède tourne autour d'un axe $x\ x_1$ parallèle à l'axe $x'\ x'_1$ du réflecteur et entraîne dans sa rotation un cylindre C tangent à l'axe $x'\ x'_1$ suivant une génératrice; ce cylindre est recouvert de papier photographique.

Une source lumineuse est placée à grande distance sur l'axe $x'\ x'_1$.

Dans ces conditions, il n'est admis sur le réflecteur qu'un pinceau très délié dont la distance à l'axe est proportionnelle à l'angle de rotation du cylindre, l'origine de la spirale étant sur l'axe $x'\ x'_1$. Le développement du papier photographique donne une courbe qui indique la position des foyers successifs correspondant à chaque point de la méridienne du réflecteur.

(1) Rev. d'Opt., t. 12, p. 480, 1933.

(2) P. Waguët, A. Stampa et J. Dourgnon. — Compt. rend. Acad. des Scien., t. 192, p. 1549, 1931.

Afin d'obtenir une projection homogène, nous avons placé devant chaque projecteur une glace translucide dépourvue de toute propriété sélective. Cette glace était constituée par un disque de verre incolore dépoli au sable, puis attaqué à l'acide fluorhydrique.

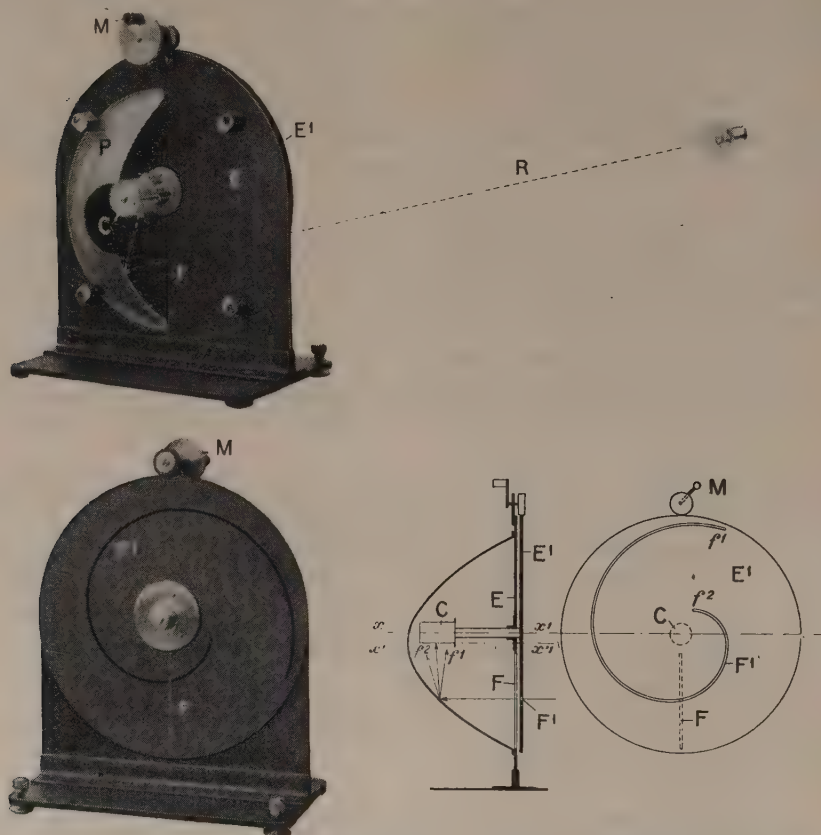


Fig. 9.— Appareil de vérification de l'aberration des miroirs de projecteurs d'automobiles.

En outre, nous avons déterminé pour chacun des projecteurs la répartition des éclairagements sur un plan situé à une distance de 25 mètres. Cette détermination était faite en plaçant dans le projecteur une lampe électrique à ampoule incolore dont les caractéristiques étaient rigoureusement les mêmes que celles des lampes utilisées au cours des essais.

Le porte-projecteurs est constitué par six bras R disposés horizontalement ; à l'extrémité de chacun d'eux est fixé un projecteur P (fig. 10).



Fig. 10. — Porte-projecteurs.

L'ensemble tourne librement sur un support vertical dont on peut faire varier l'inclinaison ; un dispositif d'ancrage permet d'immobiliser successivement chaque projecteur dans la position d'essai.

c) Détermination du seuil de perceptibilité différentielle.

La détermination du seuil de perceptibilité différentielle a été faite au moyen d'un dièdre de RITCHIE, éclairé sur chacune

de ses faces par des lampes ayant exactement la même coloration (fig. 11). Les deux lampes sont montées sur des chariots ; l'une d'elles a une intensité lumineuse I connue et l'on peut mesurer sa distance x au centre de la face du dièdre. On déplace l'autre lampe de façon à obtenir l'égalité approximative de brillance ; puis on fait un certain nombre de déplacements

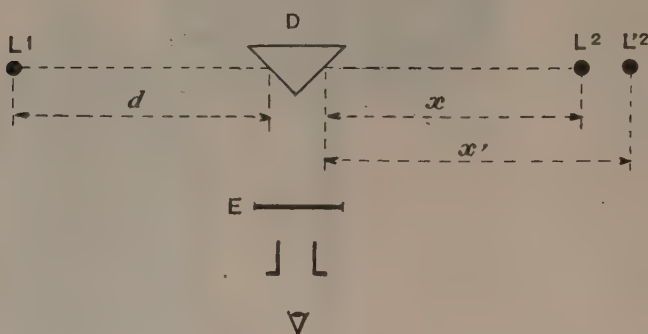


Fig. 11. — Schéma pour la détermination du seuil de perceptibilité différentielle au moyen du prisme de Ritchie.

$x' - x$ et l'on inscrit la valeur du déplacement lorsque les réponses erronées sont inférieures à 25 % de celles données par les sujets. Connaissant x et x' , le facteur de réflexion ρ du dièdre et le facteur de transmission τ de l'écran coloré placé devant l'œil, on déduit ΔB et B des relations

$$B = \frac{\rho}{\pi} \frac{I}{x^2} \frac{\sqrt{2}}{2} \tau \quad (18)$$

$$\Delta B = \frac{\rho}{\pi} I \frac{\sqrt{2}}{2} \tau \left(\frac{x'^2 - x^2}{x^2 x'^2} \right)$$

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{x'^2 - x^2}{x^2 x'^2} \quad (19)$$

Dans toutes ces mesures, on a utilisé un œilleton de 1 centimètre de diamètre pour centrer l'œil.

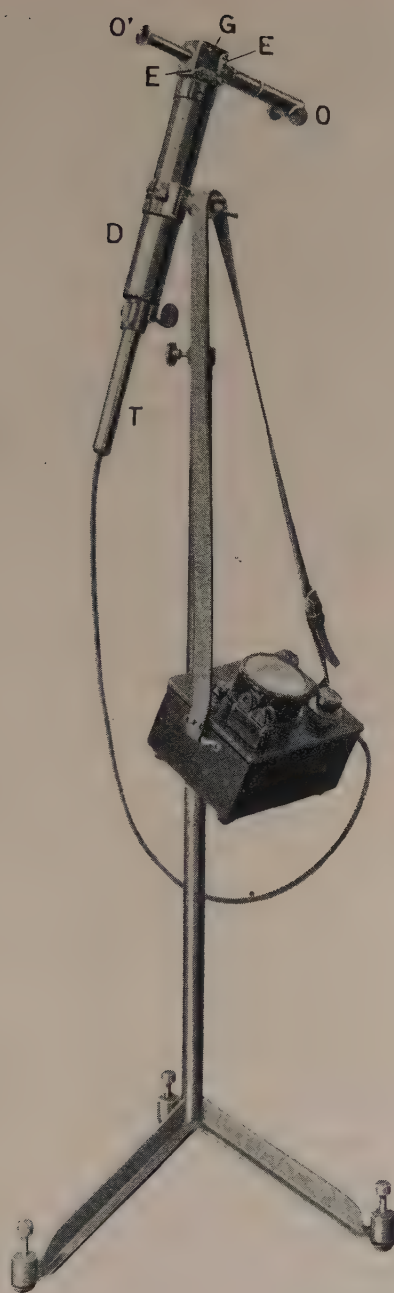


Fig. 12. — Photomètre Wagnet disposé sur un support avec un téléobjectif pour la mesure d'une brillance.

d) Détermination des brillances et des éclairéments.

Le photomètre portatif (fig. 12) que j'ai constamment utilisé au cours de mes expériences est l'appareil établi par M. WAGUET, Ingénieur au Laboratoire Central d'Electricité. Plusieurs combinaisons optiques peuvent être réalisées afin de mesurer une brillance, un éclairément ou une intensité lumineuse.

Ce photomètre se compose essentiellement d'un cube photométrique C à deux plages circulaires concentriques, d'un objectif O à mise au point réglable et d'un oculaire O' à mise au point fixe (fig. 13). La plage de comparaison F est un verre dépoli éclairé par une lampe L mobile à l'intérieur d'un tube étanche. Des écrans absorbants neutres, de facteur de transmission connu, peuvent être placés en E ou en E' selon que la brillance de la plage à mesurer est très supérieure ou très inférieure à celle de la plage de comparaison.

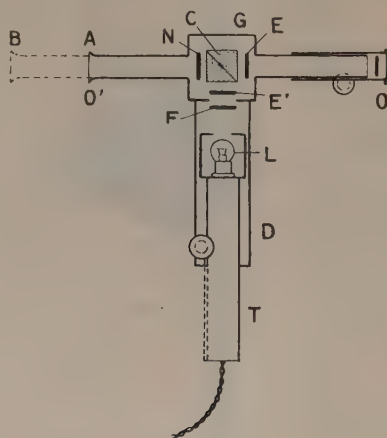


Fig. 13.— Schéma de principe du photomètre Waguet.

Pour diminuer les erreurs résultant de comparaisons trop hétérochromes, nous avons réalisé :

1° Trois verres transparents bleu, jaune et rouge dont nous avons déterminé le facteur de transmission pour la lumière d'une lampe à filament de tungstène à la température de couleur de 2 360 degrés absolus ;

2° Trois verres dépolis bleu, jaune et rouge destinés à être placés dans le photomètre et à servir de plage de comparaison F, la lampe du photomètre étant elle-même à une température voisine de 2 360 degrés absolus.

Mesure d'une brillance. - L'appareil tel qu'il vient d'être décrit sert à la mesure de la brillance d'une surface ou d'un milieu diffusants de dimensions assez grandes pour que l'image fournie par l'objectif puisse couvrir complètement la partie centrale transparente du cube photométrique.

Pour la mesure de la brillance d'objets éloignés, la longueur focale de l'objectif était de 30 centimètres; le diamètre de la partie centrale du cube photométrique étant de 0,3 centimètre, le champ de l'appareil était de 10 millièmes.

L'étalonnage a été effectué à l'aide d'une lampe étalon, à la température de couleur de 2 360 degrés absolus, fournie par le Laboratoire Central d'Electricité.

La lampe étalon, d'intensité lumineuse I, était placée à une distance d d'un bloc de carbonate de magnésium dont nous avons admis le facteur de réflexion ρ égal à 0,98. Devant l'objectif du photomètre était placé l'un des verres colorés transparents de facteur de transmission τ et, à l'intérieur du photomètre, servant de plage de comparaison, le verre dépoli de même couleur. La brillance apparente du bloc de carbonate de magnésium est donnée par la formule

$$b = \frac{\rho}{\pi} \frac{I}{d^2} \tau. \quad (20)$$

Le régime électrique de la lampe étant maintenu constant à l'aide du milliampèremètre et du rhéostat, l'égalsation des plages se faisait en déplaçant la lampe du photomètre. Si au moment de l'étalonnage la lecture sur la graduation en inverse du carré de la distance est n , la constante K du photomètre pour le verre coloré utilisé est donnée par la formule

$$\frac{\rho}{\pi} \frac{I}{d^2} \tau = K n. \quad (21)$$

En effectuant cette opération pour les verres bleu, jaune et rouge, on obtient les constantes K_B , K_J et K_R .

Le verre bleu a été utilisé lors des mesures se rapportant à la lumière de la lampe à ampoule incolore placée dans les réflecteurs en argent, en or et en cuivre, et à celle de la lampe à ampoule bleue placée dans un réflecteur en argent ; le verre jaune lors de celles se rapportant à la lumière de la lampe à ampoule jaune et à celle de la lampe à ampoule orangée ; le verre rouge lors de celles relatives à la lumière de la lampe à ampoule rouge.

Au moment d'une mesure, si la lecture est x , le régime électrique restant le même, la brillance est

$$B = K x. \quad (22)$$

Mesure d'un éclaircissement à l'aide d'un plan d'épreuve diffusant. Cette mesure s'effectue en déterminant la brillance d'un plan d'épreuve diffusant de facteur de réflexion égal à ρ' .

Sans changer le régime de la lampe, on a :

$$E = \frac{\pi B}{\rho'} = K \frac{\pi}{\rho'} x = K' x.$$

Mesure de l'éclaircissement produit par une source de petites dimensions apparentes. - Si l'on supprime l'objectif et si l'on place sur l'axe optique de l'oculaire une source lumineuse de petites dimensions apparentes, l'image de cette source se forme sur l'ocilleton et est plus petite que l'aire de celui-ci. Tout le flux reçu par la plage centrale du cube photométrique pénètre dans l'œil ; celle-ci apparaît avec une brillance uniforme qui est proportionnelle à l'intensité lumineuse de la source et varie en raison inverse du carré de la distance.

La source lumineuse est préalablement amenée dans le champ photométrique à l'aide d'un viseur B que l'on dispose provisoirement à cette fin sur l'oculaire O'.

II. - Détermination des caractéristiques physiques des atmosphères et des conditions météorologiques.

La mesure du diamètre et du nombre des gouttelettes de brouillard peut être faite au moyen du photomicromètre de la figure 14 représenté schématiquement sur la figure 15.

Il se compose :

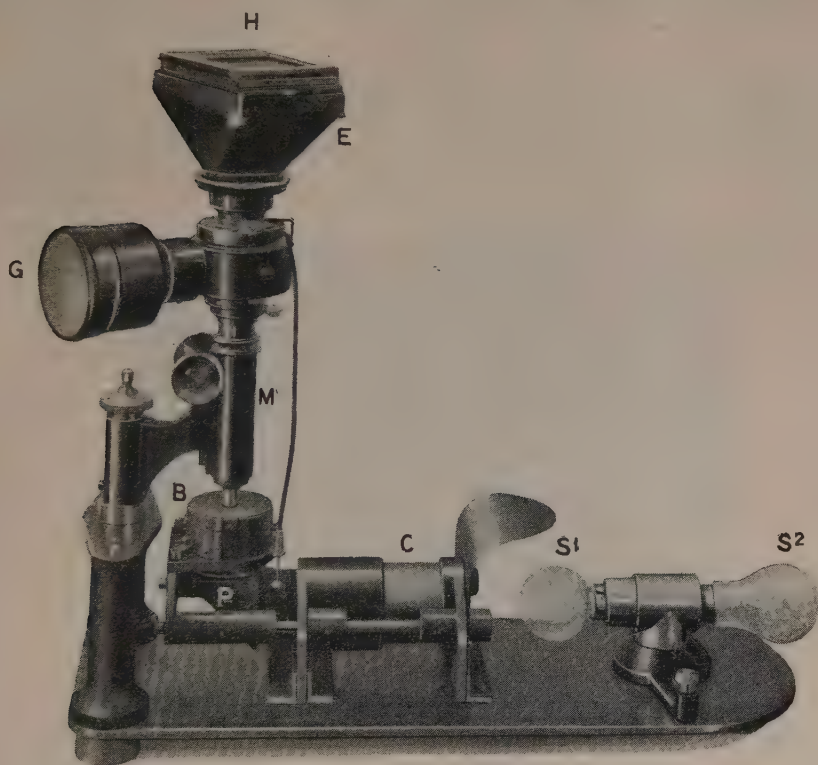


Fig. 14. — Photomicromètre utilisé pour la détermination du diamètre des gouttelettes de brouillard.

1° D'une lampe S_1 , d'un condensateur C, d'un prisme à réflexion totale P, d'un condensateur A à court foyer, placé sous l'objectif d'un microscope M et d'un écran circulaire e placé au centre de l'une des trois lentilles du condensateur A.

Le faisceau émergent est compris entre le cône $K F N$ et le cône $R F T$. Le cône $K F N$ étant un cône d'ombre à l'intérieur duquel est situé l'objectif, les gouttelettes éclairées au point de convergence F apparaissent brillantes sur fond sombre.

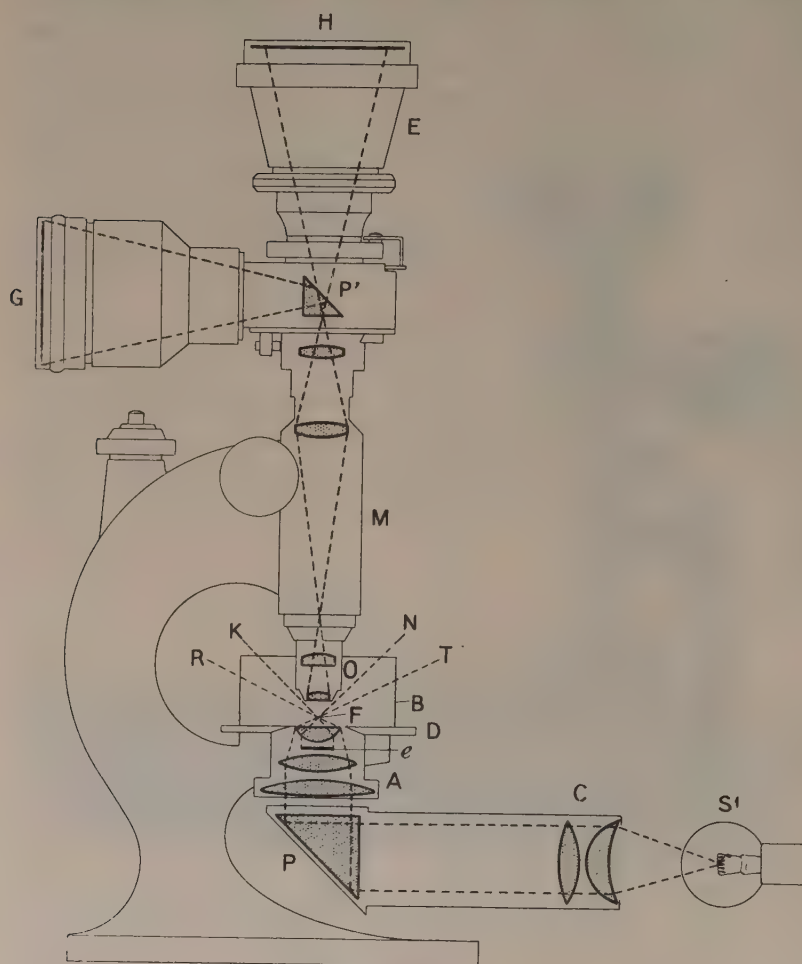


Fig. 15. — Schéma de principe du photomicromètre.

2° D'un microscope M muni d'un objectif de grossissement 10 et d'un oculaire de grossissement 20.

3° D'une chambre photographique E se fixant sur l'oculaire, d'un prisme P' et d'un verre dépoli G placé latéralement.

La mise au point s'effectue sur ce verre dépoli et le prisme est escamoté au moment de la prise de vues sur la pellicule photographique située en H.

Une lampe à volatilisation de magnésium S₂ remplace pour la prise de vues la lampe à incandescence S₁ employée pour la mise au point.

4° D'une chambre métallique B permettant de soustraire les gouttelettes à l'agitation du milieu extérieur. Ce dispositif ne peut toutefois être utilisé que dans le cas de fumées ou de brouillards à gouttelettes extrêmement rapprochées.



Fig. 16. — Microphotographie d'une fumée.
Grossissement linéaire 180.

Les points brillants représentent les particules; les cercles de grande dimension indiquent des particules situées en dehors du plan de mise au point.

5° D'une lamelle de verre recouverte d'huile de paraffine se substituant à la chambre précédente B et permettant de fixer des gouttelettes dans le champ du microscope. Ce dispositif est employé dans le cas de brouillards à gouttelettes espacées.

Comme on le voit, le photomicromètre peut être utilisé de deux façons selon que les particules restent en suspension dans l'air ou sont immobilisées sur une surface.

Le premier procédé permet de photographier les particules à l'état libre, de les mesurer et de les dénombrer (fig. 16).

Le second procédé s'applique aux brouillards dans lesquels les mesures sont rendues difficiles par suite de la grande mobilité et de l'éloignement des gouttelettes. Dans ce cas, il est possible de prendre des microphotographies de particules immobilisées ou de les observer au fur et à mesure qu'elles se fixent sur la lamelle.



Fig. 17. — Collimateur pour la mesure des anneaux de diffraction.

Nous avons aussi déterminé le diamètre moyen des particules en suspension dans l'atmosphère par la méthode des halos de diffraction obtenus à l'aide d'une source de rayons parallèles.

L'angle θ sous lequel on voit un anneau dépend du diamètre des particules, de la longueur d'onde de la radiation utilisée

et de l'anneau considéré ; cet angle est donné par la formule

$$\theta = \frac{K \lambda}{r},$$

r étant le diamètre moyen des particules et K une constante ne dépendant que de l'anneau considéré.

La détermination du diamètre des particules par la mesure des anneaux de diffraction a été réalisée au moyen d'un colli-mateur (fig. 17) dont le condensateur C, fortement diaphragmé afin d'obtenir un faisceau très délié, était muni d'un porte-objet P destiné à recevoir des écrans colorés permettant une observation plus commode des anneaux de diffraction.

La mesure de la masse totale d'eau contenue dans un mètre cube de l'atmosphère expérimentée se fait par aspiration lente d'un volume déterminé d'atmosphère au travers de tubes desséchants, pesés avant et après expérience.

L'appareil comprend un récipient A d'une capacité de 10 litres, vide d'air, pouvant être mis en communication avec l'atmosphère à travers un flacon à barbottage B rempli de billes de verre et contenant de l'acide sulfurique concentré (fig. 18).

Entre le récipient A et le flacon B se trouve un manomètre C permettant d'apprécier le vide avant l'expérience et de mesurer la pression après remplissage.

Le flacon à barbottage B est maintenu en communication constante avec l'atmosphère par l'intermédiaire d'un dessiccateur D constitué par une ampoule à bout très effilé et remplie de ponce sulfurique. Cette communication constante a pour but de maintenir égale à la pression atmosphérique la pression à l'intérieur du flacon à barbottage B, évitant ainsi l'introduction brusque d'air qui se produirait au moment de la mise en communication directe avec l'extérieur. De cette façon, entre les tarages initial et final l'humidité qui aurait tendance à pénétrer par variation de pression atmosphérique se trouve absorbée dans ce dessiccateur. Pour effectuer un prélè-

vement d'atmosphère, on détache le dessicateur D, puis on ouvre le robinet R ; l'opération dure environ 10 minutes.

La mesure du degré hygrométrique, de la température ambiante et de la pression barométrique permet de déterminer la masse d'eau à l'état de vapeur.

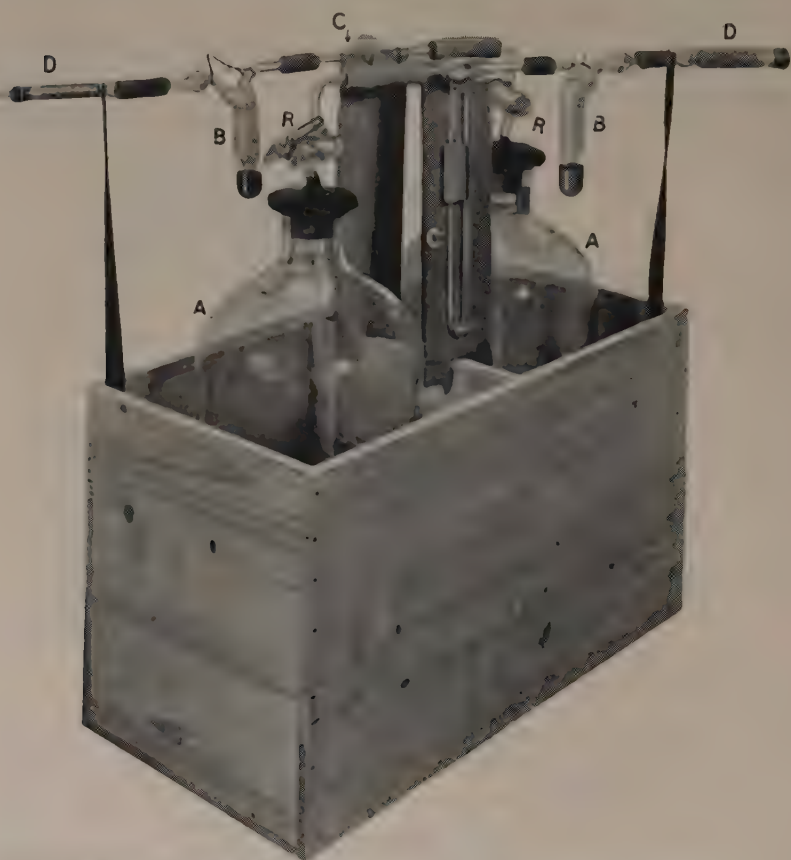


Fig. 18. — Hydrosimetre pour la mesure de la masse totale d'eau contenue dans un volume déterminé d'atmosphère.

La différence de ces deux masses permet de déduire la masse d'eau à l'état de gouttelettes et, par conséquent, le nombre de ces dernières par unité de volume en partant du diamètre précédemment déterminé.

III. - Détermination des propriétés optiques des atmosphères.

a) *Mesure du coefficient de transparence d'une atmosphère pour une lumière complexe.*

Lorsqu'un milieu trouble est sélectif, la formule

$$\tau = e^{-k x},$$

qui s'applique rigoureusement à chaque radiation simple, n'est pas valable pour un rayonnement complexe.

Le coefficient k , lorsqu'il en est ainsi, varie avec la distance et n'a plus de signification qu'entre deux points X_1 et X_2 déterminés; le facteur de transmission régulière d'une épaisseur $x_2 - x_1$ de brouillard est alors donné par la formule

$$\tau = e^{-\int_{x_1}^{x_2} h dx} \quad (23)$$

h étant le coefficient de transparence du milieu au point X .

Si l'on considère deux points X_1 et X_2 situés à des distances x_1 et x_2 du projecteur, le facteur de transmission de l'atmosphère pour l'épaisseur considérée est

$$\tau = \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_2 x_2^2}{E_1 x_1^2},$$

I_1 et I_2 étant les intensités lumineuses apparentes du projecteur aux points X_1 et X_2 , E_1 et E_2 les éclairagements en lumière directe, en supposant qu'entre ces distances et en atmosphère limpide les éclairagements varient en raison inverse du carré de la distance.

Le coefficient h étant variable entre X_1 et X_2 , nous prendrons la valeur moyenne k et nous poserons

$$\frac{E_2 x_2^2}{E_1 x_1^2} = e^{-k(x_2 - x_1)}$$

d'où l'on tire

$$k = \frac{\text{Log } \frac{E_1}{E_2} - 2 \text{ Log } \frac{x_2}{x_1}}{x_2 - x_1} \quad (24)$$

Pour mesurer le rapport $\frac{E_1}{E_2}$ j'ai appliqué deux méthodes photométriques :

1° La méthode basée sur l'*égalisation de deux brillances* au moyen du photomètre WAGUET qui permet la mesure des éclairagements sans écran diffusant.

L'éclairement sur la lentille de l'oculaire du photomètre est la somme de celui que produit le flux régulièrement transmis et de celui que produit la diffusion à travers l'atmosphère dans un angle solide égal au champ de l'appareil.

Pour réduire ce dernier, nous avons pris la précaution de placer devant le photomètre un tube d'une longueur de 0,50 mètre, muni à son extrémité d'un orifice circulaire calculé de telle sorte que l'œil de l'opérateur ne reçoive que la lumière diffusée dans l'angle solide sous lequel on aperçoit le projecteur.

Les mesures nécessaires à la détermination du coefficient de diffusion n'ayant besoin d'être connues qu'en valeur relative, aucun étalonnage n'est nécessaire. Il suffit simplement d'utiliser le verre diffusant de couleur convenable et de maintenir constant le régime électrique de la lampe étalon pendant toute la durée des expériences.

2° La méthode basée sur le *seuil de visibilité d'une brillance* au moyen d'un coin neutre à densité variable, à travers lequel on observe le projecteur jusqu'à disparition.

Cette méthode ne peut être appliquée que dans les brouillards épais caractérisés par des facteurs de transmission décimétrique ou métrique.

Le coin neutre (fig. 19) destiné à la mesure des coefficients de transparence de l'atmosphère est constitué par deux gélamines de densité variable placées chacune entre deux lamelles de verre et disposées de façon que la partie la plus claire de l'une soit en regard de la partie la plus foncée de l'autre.



Fig. 19. — Coin neutre pour la mesure du coefficient de transparence des brouillards.

Les deux gélatines peuvent se déplacer en sens contraire à l'aide d'un pignon qui agit sur chacune d'elles. Une réglette graduée H est portée par l'une d'elles et se déplace devant un index I porté par l'autre.

Nous avons mesuré les densités de ce coin pour la lumière du corps noir à la température de 2 850 degrés absolus et pour les lumières de radiation dominante de longueur d'onde 5 720, 5 830, 5 865 et 6 120 Angströms (fig. 20).

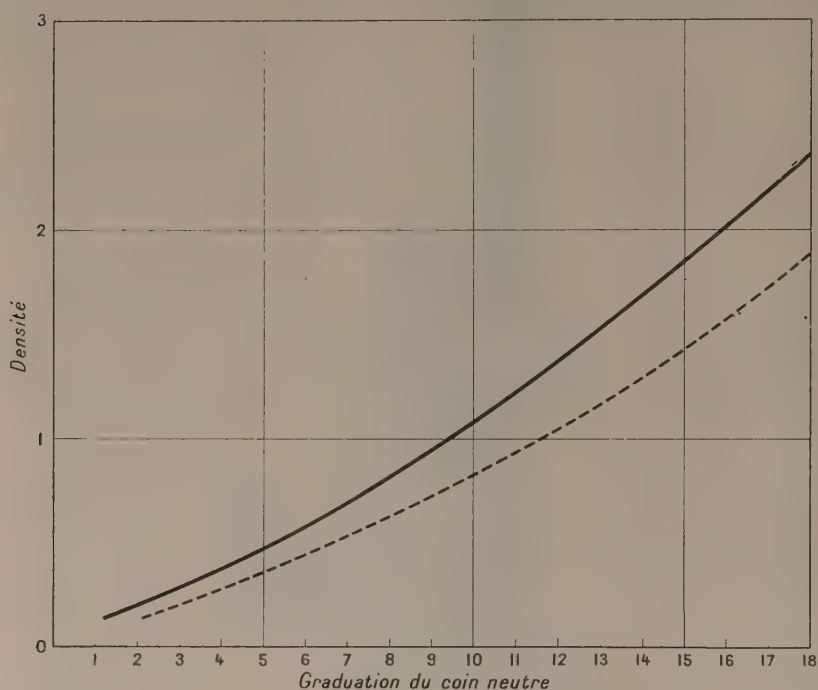


Fig. 20. — Courbes d'étalonnage du coin neutre pour diverses lumières. La courbe en trait plein se rapporte aux lumières blanche, jaune, orangée et rouge; la courbe en trait pointillé se rapporte à la lumière bleue.

Si β_1 et β_2 sont respectivement aux points X_1 et X_2 les densités optiques des coins neutres lorsque l'observateur a fait disparaître complètement le projecteur, on peut écrire, en faisant la même hypothèse que précédemment,

$$e^{-k x_2} e^{-\beta_2} = e^{-k x_1} e^{-\beta_1}$$

d'où

$$k = \frac{\beta_2 - \beta_1}{x_1 - x_2} \quad (25)$$

Considérons deux sources d'égale intensité lumineuse, l'une de lumière blanche, l'autre de lumière colorée. Désignons par k_b et k_c les coefficients de transparence d'un brouillard pour la lumière blanche et la lumière colorée, par x_b et x_c les distances auxquelles les intensités lumineuses transmises sont égales, on a

$$e^{-k_c x_c} = e^{-k_b x_b}$$

d'où

$$\frac{k_c}{k_b} = \frac{x_b}{x_c} \quad (26)$$

Il est intéressant de connaître la valeur de ce rapport pour les différentes lumières colorées.

Parallèlement à la mesure du coefficient de transparence, j'ai mesuré l'éclairement sur le plan d'épreuve diffusant du photomètre WAGUET, afin d'étudier la loi de variation de cet éclairement en fonction de la distance pour chacune des lumières complexes.

Dans ce cas le plan d'épreuve diffusant reçoit, outre la lumière directe, toute la lumière diffusée par l'atmosphère dans un angle solide égal à 2π .

Enfin, envisageant la transmission de la lumière sur de plus grandes distances, j'ai étudié la variation de la longueur d'onde de la radiation dominante de la lumière transmise. Cette mesure est effectuée en comparant la couleur de la lumière transmise à celle des radiations simples du spectre.

L'étude n'a été faite que dans le cas de lumières ayant un facteur de pureté voisin de l'unité. Nous avons réalisé un colorimètre (fig. 21) en remplaçant dans le spectromètre JOBIN et YVON l'oculaire par un cube photométrique C à bande argentée, par une lentille oculaire L_3 et par un œilleton O placé au foyer de cette lentille. La bande argentée a une largeur de 0,2 millimètre (fig. 22).

Grâce à cette disposition, la partie transparente du cube photométrique apparaît à l'œil uniformément brillante ; sur ce fond brillant se détache une bande spectrale réfléchie par la partie argentée.



Fig. 21. — Colorimètre pour l'étude de la variation dans les brouillards de la couleur des lumières de facteur de pureté voisin de l'unité.

L'égalisation des brillances est obtenue en faisant varier la température de la lampe S_1 , l'égalisation des couleurs par la rotation du prisme. Toutefois, afin d'éliminer la lumière diffusée par l'atmosphère, nous avons disposé sur l'axe de l'oculaire un tube T diaphragmé identique à celui utilisé dans le même but sur le photomètre.

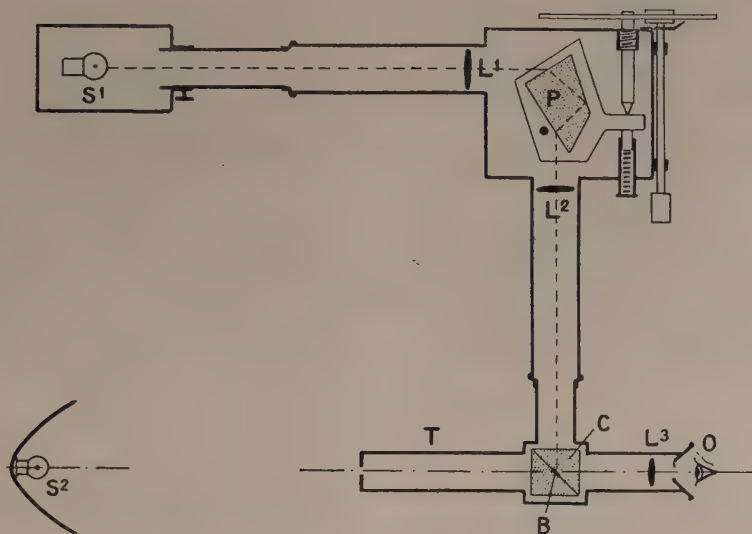


Fig. 22. — Schéma de principe du colorimètre.

b) Mesure de la lumière diffusée en arrière.

Un test apparaît non pas avec sa brillance réelle, mais avec une brillance apparente qui dépend de celle de l'épaisseur d'atmosphère comprise entre le test et l'observateur. Il est donc intéressant de mesurer la valeur de la brillance de l'atmosphère en se plaçant à proximité et en arrière du projecteur.

c) Détermination de la distance limite de visibilité d'un test.

D'une façon générale, en désignant par B_T la brillance réelle d'un test et par B_F la brillance réelle du fond sur lequel il se

détache, le contraste est défini par le rapport

$$C = \frac{B_T - B_F}{B_F} \quad (27)$$

Un test est visible pour un observateur quand le contraste de ce test avec le fond sur lequel il est placé est supérieur au seuil de perceptibilité différentielle de l'observateur défini par le rapport $\frac{\Delta B}{B}$, B étant la brillance de deux plages contiguës et ΔB la variation minimum de brillance permettant de les différencier.

En désignant par B'_T la brillance apparente du test et par B'_F celle du fond d'atmosphère, le contraste pour un observateur situé à proximité et en arrière du projecteur, est donné par la relation

$$C_a = \frac{B'_T - B'_F}{B'_F} \quad (28)$$

Le seuil de perceptibilité différentielle étant fonction de la brillance, la distance limite de visibilité d'un test dépend de l'intensité lumineuse du projecteur.

Dans ces conditions j'ai recherché :

1° La loi de variation de la distance de visibilité d'un test en fonction de l'intensité lumineuse d'un projecteur en lumière blanche en interposant devant l'œil de l'observateur un coin neutre successivement réglé à différentes valeurs du facteur de transmission, ce qui revient à diminuer l'intensité lumineuse dans la même proportion ;

2° Les distances limites de visibilité du test en lumières colorées et en lumière blanche.

À partir de ces résultats j'ai comparé, à égalité d'intensité lumineuse, les distances relatives de visibilité du test éclairé

par chacune de ces lumières. La position des points représentatifs des lumières colorées par rapport à la courbe de visibilité en lumière blanche permet de déduire l'augmentation ou la diminution des distances de visibilité résultant de l'emploi de ces lumières colorées.

Le test était formé par un panneau de 1,50 mètre de côté recouvert d'une peinture mate formée de blanc de zinc, de noir de fumée et d'outremer; son facteur de réflexion était de 0,16.

Nous avons vérifié que cette peinture n'avait aucune propriété sélective en l'éclairant avec la lumière d'une lampe à ampoule incolore, et en l'observant avec le photomètre WAGUET, dont nous avons réglé le régime de la lampe de façon à obtenir la même coloration des deux plages.

L'égalisation de la brillance de la plage d'observation avec la plage de comparaison réalisée en lumière blanche subsistait quand on interposait deux verres bleus, jaunes ou rouges, l'un devant le test, l'autre devant la plage de comparaison du photomètre.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS DES ESSAIS

I. - Essais préliminaires en laboratoire.

a) Caractéristiques des lumières.

Le tableau I contient, à gauche les données numériques se rapportant à la visibilité et aux sensations colorées rouge, verte

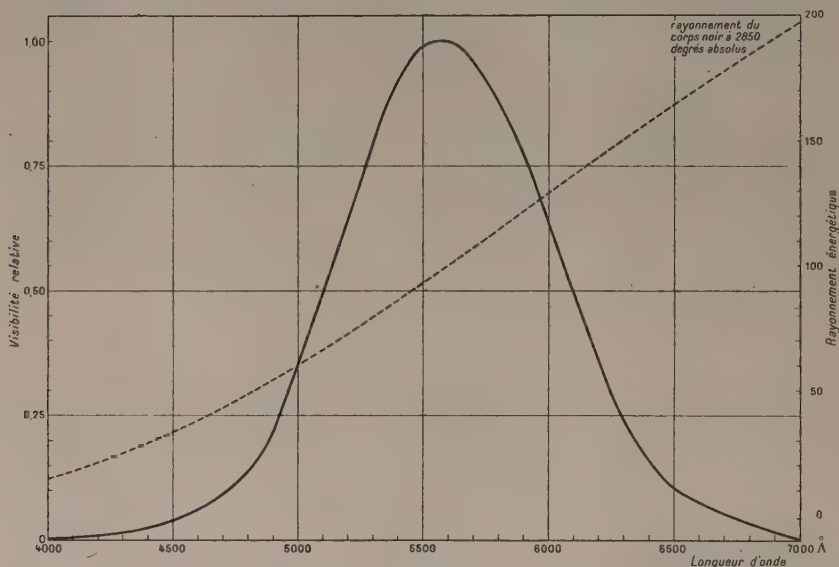


Fig. 23. — Courbe de visibilité relative de l'œil et courbe du rayonnement du corps noir à la température de 2 850 degrés absolus.

et bleue dans un spectre d'égale énergie ⁽¹⁾ et, à droite celles se rapportant à l'énergie relative du corps noir à la température de 2 850 degrés absolus ⁽²⁾, à la luminosité et aux sensations

(1) Ces données sont tirées des travaux de H. E. Ives, publiés dans le Journal of the Franklin Institute, t. 195, p. 23, 1923.

(2) Cette énergie a été calculée à partir de la formule de Planck
$$I = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\frac{C_2}{e^{\lambda T}} - 1},$$

en prenant pour la constante C_2 la valeur 14 330 et pour la radiation 5 600 Angstroms la valeur 100.

colorées pour le spectre du corps noir à cette température (fig. 23); il contient, en outre, les valeurs de la luminosité totale et des sensations colorées totales.

TABLEAU I

λ	DONNÉES RELATIVES A L'ŒIL				CORPS NOIR A 2 850 DEGRES ABSOLUS				
	Λ	R	V	B	E	E Λ	ER	EV	EB
4000	0,002	0,011		0,186	14,8	0,03	0,16		2,75
4100	0,003	0,016		0,319	17,8	0,05	0,28		5,67
4200	0,010	0,019		0,482	21,1	0,21	0,40		10,17
4300	0,018	0,015		0,743	24,8	0,45	0,37		18,43
4400	0,029	0,008	0,005	0,929	28,8	0,83	0,23	0,14	26,75
4500	0,041	0,000	0,017	0,949	33,2	1,36	0,00	0,58	31,50
4600	0,058	0,001	0,038	0,867	37,9	2,20	0,04	1,44	32,85
4700	0,090	0,010	0,067	0,705	43,0	3,87	0,43	2,88	30,30
4800	0,138	0,022	0,109	0,461	48,4	6,68	1,06	5,28	22,31
4900	0,215	0,062	0,165	0,233	54,1	11,63	3,35	8,92	12,60
5000	0,341	0,123	0,244	0,123	60,0	20,46	7,38	14,64	7,38
5100	0,493	0,199	0,346	0,081	66,2	32,65	13,17	22,91	5,36
5200	0,638	0,275	0,453	0,053	72,6	46,30	19,95	32,90	3,85
5300	0,795	0,340	0,525	0,037	79,2	63,96	26,90	41,55	2,93
5400	0,919	0,399	0,569	0,028	86,0	79,03	34,30	48,90	2,41
5500	0,992	0,441	0,577	0,022	93,0	92,25	41,00	53,65	2,04
5600	0,999	0,466	0,554	0,017	100,0	99,90	46,60	55,40	1,70
5700	0,953	0,470	0,494	0,014	107,1	102,06	50,35	52,92	1,50
5800	0,879	0,462	0,394	0,010	114,3	100,47	52,80	45,05	1,14
5900	0,777	0,438	0,287	0,005	121,6	94,48	53,26	34,90	0,61
6000	0,633	0,398	0,198	0,002	128,8	81,55	51,30	25,50	0,26
6100	0,491	0,348	0,133	0,001	136,1	66,81	47,35	18,10	0,14
6200	0,362	0,289	0,092		143,4	51,93	41,45	13,19	
6300	0,240	0,214	0,056		150,5	36,11	32,20	8,42	
6400	0,164	0,153	0,034		157,4	25,82	24,09	5,35	
6500	0,101	0,096	0,018		164,5	16,62	15,80	2,96	
6600	0,060	0,058	0,010		171,5	10,29	9,94	1,71	
6700	0,038	0,034	0,005		178,1	6,77	6,06	0,89	
6800	0,022	0,015	0,002		184,2	4,05	2,76	0,37	
6900	0,013	0,010	0,001		191,1	2,48	1,91	0,19	
7000	0,007	0,005			197,5	1,38	0,99		
Sommes					1062,68	585,88	498,74	222,65	

Les tableaux II, III et IV sont relatifs aux miroirs métalliques que nous avons utilisés ou tenté d'utiliser en conjugaison avec des lampes à ampoule en verre incolore.

TABLEAU II

λ	OR					CUIVRE				
	ρ	EA ρ	ER ρ	EV ρ	EB ρ	ρ	EA ρ	ER ρ	EV ρ	EB ρ
4000	0,270	0,01	0,04		0,74	0,345	0,01	0,05		0,95
4100	0,275	0,01	0,08		1,56	0,355	0,02	0,10		2,01
4200	0,280	0,06	0,11		2,85	0,365	0,08	0,14		3,72
4300	0,297	0,13	0,11		5,47	0,380	0,17	0,14		7,00
4400	0,310	0,26	0,07	0,04	8,29	0,390	0,32	0,09	0,05	10,43
4500	0,325	0,44	0,00	0,19	10,23	0,402	0,54	0,00	0,23	12,66
4600	0,345	0,76	0,01	0,50	11,33	0,415	0,91	0,02	0,60	13,64
4700	0,370	1,43	0,16	1,06	11,21	0,426	1,65	0,18	1,22	12,91
4800	0,395	2,64	0,42	2,08	8,82	0,438	2,92	0,46	2,31	9,77
4900	0,427	4,96	1,43	3,81	5,38	0,452	5,25	1,51	4,03	5,70
5000	0,465	9,50	3,43	6,81	3,43	0,465	9,50	3,43	6,81	3,43
5100	0,510	16,65	6,72	11,68	2,73	0,479	15,64	6,31	10,98	2,56
5200	0,550	25,46	10,97	18,09	2,12	0,490	22,69	9,78	16,12	1,88
5300	0,590	37,71	15,86	24,50	1,73	0,505	32,27	13,58	20,97	1,48
5400	0,628	49,65	21,53	30,70	1,51	0,520	41,10	17,83	25,42	1,25
5500	0,665	61,32	27,25	35,66	1,36	0,540	49,80	22,13	28,95	1,10
5600	0,700	69,93	32,60	38,76	1,19	0,574	57,28	26,73	31,80	0,98
5700	0,725	73,99	36,50	38,35	1,09	0,640	65,32	32,20	33,85	0,96
5800	0,742	74,55	39,15	33,41	0,85	0,695	69,82	36,70	31,30	0,79
5900	0,758	71,61	40,35	26,44	0,46	0,745	70,39	39,67	26,00	0,45
6000	0,770	62,80	39,50	19,63	0,20	0,780	63,61	40,00	19,89	0,20
6100	0,780	52,11	36,93	14,12	0,11	0,805	53,78	38,11	14,57	0,11
6200	0,792	41,12	32,82	10,45		0,820	42,58	34,00	10,82	
6300	0,803	28,99	25,85	6,76		0,827	29,87	26,61	6,96	
6400	0,813	20,99	19,58	4,35		0,830	21,43	20,00	4,44	
6500	0,825	13,71	13,04	2,44		0,831	13,79	13,13	2,46	
6600	0,835	8,59	8,30	1,43		0,832	8,56	8,26	1,42	
6700	0,843	5,71	5,11	0,75		0,833	5,64	5,05	0,74	
6800	0,850	3,44	2,35	0,31		0,834	3,38	2,30	0,31	
6900	0,860	2,13	1,64	0,16		0,835	2,07	1,59	0,16	
7000	0,865	1,19	0,86			0,836	1,15	0,83		
Sommes		741,85	422,77	332,48	82,66		691,54	400,93	302,41	93,98

Le tableau II contient les facteurs spectraux de réflexion de l'or pur et du cuivre pur ainsi que la luminosité et les sensations colorées spectrales et totales, pour le rayonnement du

TABLEAU III

λ	ALLIAGE D'OR ET DE CUIVRE (OR ROUGE)					ALLIAGE D'OR ET DE ZINC (OR VERT)				
	ρ	EA ρ	ER ρ	EV ρ	EB ρ	ρ	EA ρ	ER ρ	EV ρ	EB ρ
4000	0,305	0,01	0,05		0,84	0,195	0,01	0,03		0,54
4100	0,315	0,01	0,09		1,78	0,200	0,01	0,06		1,13
4200	0,325	0,07	0,13		3,31	0,215	0,04	0,09		2,19
4300	0,335	0,15	0,12		6,18	0,230	0,10	0,09		4,24
4400	0,345	0,29	0,08	0,05	9,22	0,252	0,21	0,06	0,04	6,74
4500	0,357	0,48	0,00	0,21	11,24	0,275	0,37	0,00	0,16	8,66
4600	0,367	0,81	0,01	0,53	12,05	0,304	0,67	0,01	0,44	9,98
4700	0,378	1,46	0,16	1,09	11,45	0,332	1,28	0,14	0,96	10,06
4800	0,390	2,60	0,41	2,06	8,70	0,365	2,44	0,39	1,93	8,14
4900	0,400	4,65	1,34	3,57	5,04	0,397	4,61	1,33	3,54	5,00
5000	0,412	8,42	3,04	6,03	3,04	0,427	8,73	3,15	6,25	3,15
5100	0,425	13,88	5,60	9,74	2,28	0,453	14,79	5,97	10,37	2,43
5200	0,437	20,23	8,72	14,38	1,68	0,470	21,76	9,38	15,46	1,81
5300	0,454	29,04	12,21	18,85	1,33	0,483	30,89	12,98	20,07	1,41
5400	0,470	37,15	16,12	22,98	1,13	0,493	38,97	16,90	24,10	1,19
5500	0,490	45,20	20,10	26,26	1,00	0,500	46,12	20,50	26,80	1,02
5600	0,515	51,45	24,00	28,53	0,88	0,506	50,55	23,59	28,02	0,86
5700	0,540	55,11	27,17	28,56	0,81	0,513	52,39	25,81	27,13	0,77
5800	0,565	56,76	29,80	25,45	0,64	0,520	52,24	27,43	23,41	0,59
5900	0,593	56,02	31,56	20,70	0,36	0,525	49,60	27,94	18,32	0,32
6000	0,620	50,56	31,80	15,81	0,16	0,530	43,22	27,18	13,52	0,14
6100	0,640	42,75	30,30	11,58	0,09	0,536	35,80	25,37	9,70	0,07
6200	0,660	34,26	27,35	8,71		0,542	28,14	22,46	7,15	
6300	0,675	24,37	21,73	5,68		0,546	19,71	17,58	4,60	
6400	0,687	17,73	16,54	3,67		0,550	14,20	13,24	2,94	
6500	0,696	11,56	11,00	2,06		0,553	9,18	8,74	1,64	
6600	0,705	7,25	7,00	1,20		0,555	5,71	5,51	0,95	
6700	0,710	4,81	4,30	0,63		0,557	3,77	3,37	0,49	
6800	0,715	2,89	1,97	0,26		0,559	2,26	1,54	0,21	
6900	0,720	1,79	1,37	0,14		0,560	1,39	1,07	0,11	
7000	0,723	0,99	0,72			0,561	0,77	0,55		
Sommes	582,75	334,79	258,73	83,21		539,93	302,46	248,31	70,44	

corps noir à la température de 2 850 degrés absolus et réfléchi par ces métaux (fig. 24 et fig. 25).

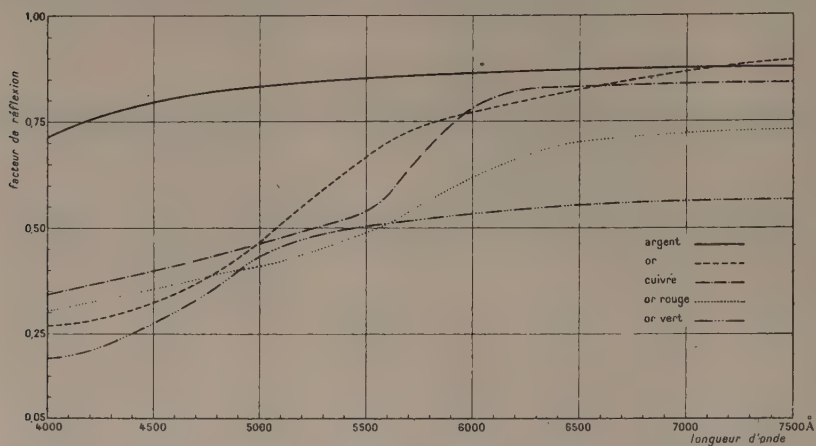


Fig. 24. — Courbes de réflexion spectrale de divers miroirs métalliques.

Le tableau III renferme les mêmes valeurs pour des alliages d'or et de cuivre (or rouge) et d'or et de zinc (or vert).

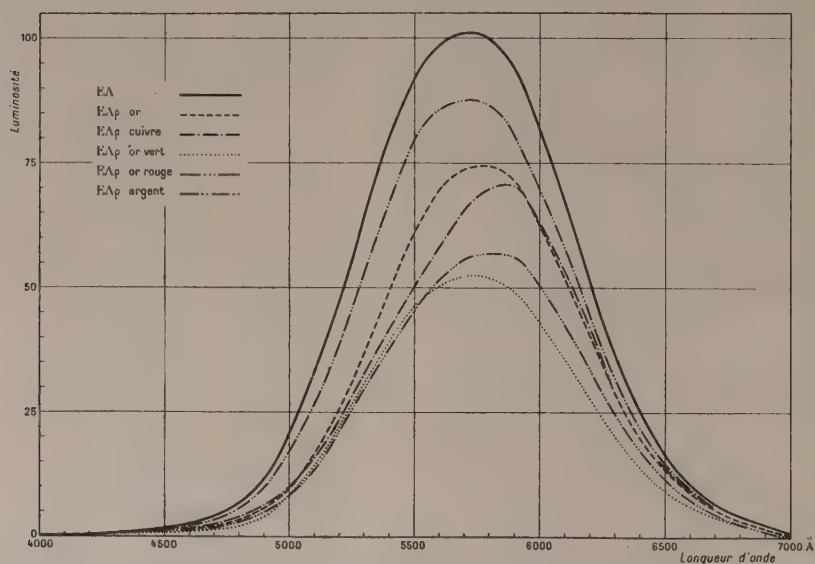


Fig. 25. — Courbes de luminosité du rayonnement émis par le corps noir à la température de 2 850 degrés absolus et de ce même rayonnement réfléchi par divers miroirs métalliques.

Le tableau IV est relatif à l'argent dont les propriétés sélectives peu marquées sont bien connues (fig. 24 et fig. 25).

TABLEAU IV

λ	ARGENT				
	φ_a	$E\Lambda\varphi_a$	$ER\varphi_a$	$EV\varphi_a$	$EB\varphi_a$
4000	0,715	0,02	0,11		1,96
4100	0,735	0,04	0,20		4,17
4200	0,755	0,16	0,30		7,68
4300	0,770	0,35	0,28		14,20
4400	0,785	0,65	0,18	0,11	21,00
4500	0,795	1,08	0,00	0,46	25,05
4600	0,805	1,77	0,03	1,16	26,44
4700	0,810	3,13	0,35	2,33	24,54
4800	0,816	5,45	0,87	4,31	18,21
4900	0,821	9,55	2,75	7,32	10,34
5000	0,827	16,91	6,11	12,11	6,11
5100	0,832	27,15	10,96	19,05	4,46
5200	0,837	38,75	16,70	27,54	3,22
5300	0,840	53,68	22,60	34,90	2,46
5400	0,845	66,80	28,97	41,31	2,04
5500	0,850	78,35	34,86	45,58	1,73
5600	0,852	85,10	39,70	47,20	1,45
5700	0,855	87,26	43,04	45,24	1,28
5800	0,857	86,10	45,25	38,60	0,98
5900	0,860	81,25	45,80	30,00	0,52
6000	0,862	70,29	44,20	21,97	0,22
6100	0,864	57,76	40,90	15,64	0,12
6200	0,866	44,95	35,90	11,42	
6300	0,868	31,32	27,95	7,31	
6400	0,869	22,42	20,94	4,65	
6500	0,870	14,45	13,75	2,57	
6600	0,871	8,97	8,66	1,49	
6700	0,872	5,91	5,28	0,78	
6800	0,873	3,54	2,41	0,32	
6900	0,874	2,17	1,67	0,16	
7000	0,875	1,21	0,87		
Sommes		906,54	501,59	423,53	178,18

Quoique la formule de DRUDE ⁽¹⁾, théoriquement valable pour les grandes longueurs d'onde, indique qu'il n'y a pas intérêt à utiliser des alliages pour la réalisation des miroirs (la résistivité d'un alliage étant toujours supérieure à celle des métaux qui le constituent), nous avons tenu à déterminer les caractéristiques des alliages d'or qui ont été préconisés en raison de leur inaltérabilité et de leur couleur.

La sélectivité et le facteur de réflexion total de ces alliages étant moindres que pour l'or et le cuivre, nous avons délibérément écarté ces alliages de nos essais.

Les tableaux V, VI et VII se rapportent au verre des ampoules utilisées; ces tableaux contiennent les facteurs de transmission spectraux, la luminosité et les sensations colorées pour le spectre du corps noir à la température de 2 850 degrés absolus transmis par les ampoules et réfléchi par un miroir argenté (fig. 26 et fig. 27).

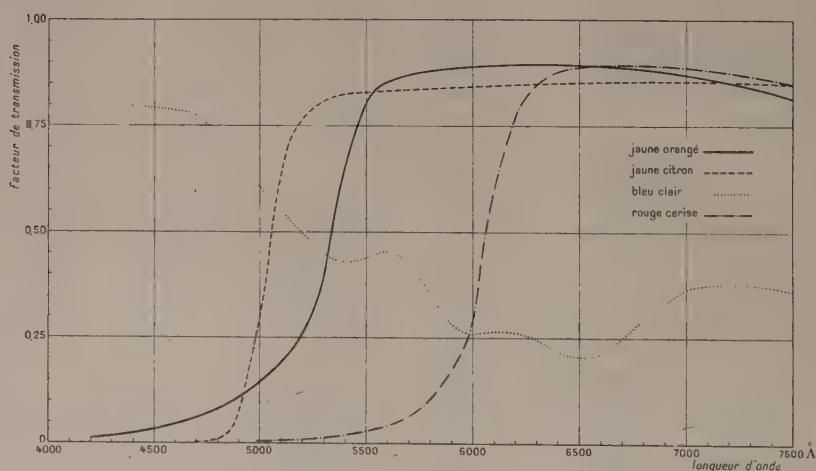


Fig. 26. — Courbes de transmission spectrale de diverses ampoules de lampes.

(1) Cette formule est $\rho_{\lambda} = 1 - \beta \sqrt{\frac{r}{\lambda}}$, ρ_{λ} étant le facteur de réflexion pour la radiation de longueur d'onde λ et r la résistivité du métal.

Le tableau V est relatif à des verres d'ampoule bleu clair (verre au cuivre) et jaune citron (verre au cadmium); le tableau VI à deux verres orangés à base de cadmium et de

TABLEAU V

λ	VERRE BLEU CLAIR					VERRE JAUNE CITRON				
	τ	$EA_{\rho\alpha\tau}$	$ER_{\rho\alpha\tau}$	$EV_{\rho\alpha\tau}$	$EB_{\rho\alpha\tau}$	τ	$EA_{\rho\alpha\tau}$	$ER_{\rho\alpha\tau}$	$EV_{\rho\alpha\tau}$	$EB_{\rho\alpha\tau}$
4200	0,800	0,13	0,24		6,14					
4300	0,798	0,28	0,22		11,34					
4400	0,795	0,52	0,14	0,09	16,69					
4500	0,790	0,95	0,00	0,36	19,79					
4600	0,778	1,38	0,02	0,89	20,58					
4700	0,758	2,37	0,26	1,76	18,60	0,004	0,01		0,01	0,10
4800	0,722	3,93	0,63	3,11	13,15	0,012	0,06	0,01	0,05	0,22
4900	0,665	6,35	1,83	4,87	6,88	0,055	0,52	0,15	0,40	0,57
5000	0,605	10,23	3,70	7,32	3,70	0,285	4,82	1,74	3,45	1,74
5100	0,548	14,87	6,00	10,44	2,44	0,645	17,51	7,07	12,29	2,87
5200	0,495	19,17	8,27	13,64	1,59	0,770	29,85	12,87	21,22	2,48
5300	0,446	23,95	10,08	15,56	1,10	0,810	43,50	18,31	28,28	1,99
5400	0,430	28,71	12,46	17,76	0,88	0,824	55,05	23,87	34,05	1,68
5500	0,441	34,56	15,37	20,10	0,76	0,828	64,90	28,86	37,75	1,43
5600	0,456	38,80	18,10	21,52	0,66	0,832	70,80	33,04	39,29	1,21
5700	0,425	37,10	18,29	19,23	0,54	0,835	72,86	35,95	37,78	1,07
5800	0,350	30,14	15,84	13,51	0,34	0,837	72,06	37,88	32,30	0,82
5900	0,278	22,59	12,73	8,34	0,14	0,840	68,25	38,50	25,20	0,44
6000	0,260	18,28	11,50	5,71	0,06	0,842	59,20	37,23	18,50	0,18
6100	0,265	15,30	10,84	4,15	0,03	0,844	48,73	34,51	13,20	0,10
6200	0,262	11,78	9,41	2,99		0,846	38,04	30,37	9,66	
6300	0,244	7,64	6,82	1,78		0,849	26,59	23,72	6,20	
6400	0,215	4,82	4,50	1,00		0,851	19,07	17,81	3,95	
6500	0,208	3,00	2,86	0,53		0,853	12,33	11,73	2,19	
6600	0,212	1,90	1,83	0,32		0,855	7,67	7,40	1,27	
6700	0,250	1,48	1,32	0,19		0,855	5,05	4,51	0,67	
6800	0,295	1,04	0,71	0,09		0,855	3,03	2,06	0,27	
6900	0,335	0,73	0,56	0,05		0,854	1,85	1,43	0,14	
7000	0,361	0,44	0,31			0,853	1,03	0,74		
Sommes		342,44	174,84	175,31	125,41		722,78	409,70	328,12	16,90

sélénium ⁽¹⁾; le tableau VII à un verre rouge cerise à base de sélénium.

Le tableau VIII donne pour la lumière du corps noir à 2 850 degrés absolus et pour cette lumière réfléchiée par les métaux ou transmise par les verres précédents les sensations relatives colorées, la longueur d'onde de la radiation de luminosité maximum, la longueur d'onde de la radiation dominante et le facteur de pureté.

Nous ferons remarquer que les facteurs de réflexion spectraux que nous avons relevés sont inférieurs pour l'or et l'argent et supérieurs pour le cuivre à ceux indiqués par RUBENS et HAGEN ⁽²⁾. Ces anomalies proviennent vraisemblablement de ce que nous avons opéré sur des métaux industriels moins purs en ce qui concerne l'or et l'argent, au contraire d'une pureté plus grande en ce qui concerne le cuivre.

L'effet sélectif des métaux ou des verres colorés se traduit

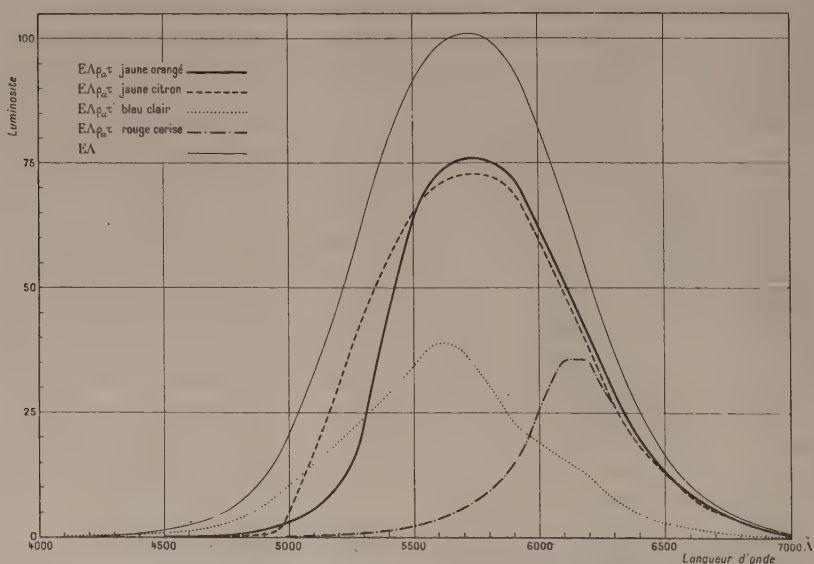


Fig. 27. — Courbes de luminosité du rayonnement émis par le corps noir à la température de 2 850 degrés absolus et de ce même rayonnement transmis par diverses ampoules colorées et réfléchi par un miroir en argent.

(1) Quoique les caractéristiques de ces verres soient assez différentes, nous n'avons retenu, pour nos expériences, que le verre le plus clair.

(2) Recueil des Constantes Physiques, p. 547, 1913.

par une variation de la longueur d'onde de la radiation dominante insignifiante pour les premiers, mais notable pour les seconds, et une variation du facteur de pureté peu importante pour les premiers, mais considérable pour les seconds.

TABLEAU VI

λ	VERRE JAUNE ORANGÉ					VERRE ORANGÉ ROUGE				
	τ	$E\lambda_{\rho a\tau}$	$ER_{\rho a\tau}$	$EV_{\rho a\tau}$	$EB_{\rho a\tau}$	τ	$E\lambda_{\rho a\tau}$	$ER_{\rho a\tau}$	$EV_{\rho a\tau}$	$EB_{\rho a\tau}$
4200	0,005				0,04					
4300	0,014				0,20					
4400	0,022	0,01			0,46					
4500	0,033	0,03		0,01	0,83	0,007	0,01			0,17
4600	0,045	0,08	0,01	0,05	1,19	0,011	0,02		0,01	0,29
4700	0,060	0,19	0,02	0,14	1,47	0,016	0,05		0,04	0,39
4800	0,080	0,44	0,07	0,34	1,46	0,022	0,12	0,02	0,09	0,40
4900	0,112	1,07	0,31	0,82	1,16	0,028	0,27	0,08	0,20	0,29
5000	0,152	2,57	0,93	1,84	0,93	0,036	0,61	0,22	0,44	0,22
5100	0,196	5,32	2,15	3,73	0,87	0,056	1,52	0,61	1,06	0,25
5200	0,252	9,76	4,21	6,94	0,81	0,075	2,91	1,25	2,07	0,24
5300	0,390	20,94	8,81	13,62	0,96	0,098	5,26	2,21	3,42	0,24
5400	0,660	44,09	19,12	27,26	1,35	0,122	8,14	3,53	5,04	0,25
5500	0,810	63,46	28,24	36,92	1,40	0,150	11,76	5,23	6,84	0,26
5600	0,850	72,30	33,75	40,12	1,23	0,192	16,35	7,62	9,06	0,28
5700	0,870	75,91	37,45	39,36	1,11	0,272	23,74	11,71	12,31	0,35
5800	0,880	75,77	39,83	33,96	0,86	0,460	39,61	20,81	17,75	0,45
5900	0,884	71,82	40,48	26,51	0,46	0,715	58,09	32,73	21,45	0,37
6000	0,887	62,35	39,20	19,44	0,19	0,790	55,53	34,92	17,35	0,17
6100	0,890	51,40	36,41	13,94	0,11	0,840	48,50	34,37	13,14	0,10
6200	0,893	40,13	32,06	10,20		0,870	39,10	31,24	9,94	
6300	0,895	28,03	25,01	6,54		0,887	27,79	24,80	6,48	
6400	0,892	20,00	18,68	4,15		0,895	20,06	18,75	4,16	
6500	0,890	12,86	12,25	2,29		0,900	13,00	12,38	2,31	
6600	0,888	7,97	7,69	1,32		0,903	8,11	7,82	1,34	
6700	0,885	5,23	4,67	0,69		0,905	5,35	4,78	0,70	
6800	0,880	3,11	2,12	0,28		0,905	3,20	2,18	0,29	
6900	0,875	1,90	1,46	0,14		0,905	1,96	1,51	0,14	
7000	0,867	1,05	0,75			0,905	1,09	0,79		
Sommes		677,79	395,68	290,61	17,09		392,15	259,56	135,63	4,72

TABLEAU VII

λ	VERRE ROUGE CERISE				
	τ	$E\lambda\rho_a\tau$	$ER\rho_a\tau$	$EV\rho_a\tau$	$EB\rho_a\tau$
5000	0,002	0,03	0,01	0,02	0,01
5100	0,003	0,08	0,03	0,06	0,01
5200	0,007	0,27	0,12	0,19	0,02
5300	0,011	0,59	0,25	0,38	0,03
5400	0,020	1,33	0,58	0,83	0,04
5500	0,032	2,51	1,11	1,46	0,05
5600	0,046	3,82	1,83	2,17	0,07
5700	0,066	5,76	2,84	2,99	0,08
5800	0,105	9,04	4,75	4,05	0,10
5900	0,175	14,23	8,01	5,25	0,09
6000	0,345	24,26	15,25	7,58	0,08
6100	0,610	35,21	24,95	9,54	0,07
6200	0,780	35,05	28,00	8,91	
6300	0,845	26,46	23,61	6,18	
6400	0,879	19,70	18,41	4,09	
6500	0,883	12,76	12,14	2,27	
6600	0,890	7,99	7,71	1,33	
6700	0,893	5,28	4,71	0,70	
6800	0,891	3,15	2,15	0,28	
6900	0,886	1,92	1,48	0,14	
7000	0,883	1,07	0,77		
Sommes		210,51	158,71	58,42	0,65

Le tableau IX donne les facteurs totaux de réflexion et de transmission calculés :

a) d'après la luminosité.

Les facteurs s'obtiennent en faisant le rapport de la luminosité totale d'une lumière réfléchie ou transmise à celle de la lumière incidente ; par exemple, pour l'or, nous avons :

$$\tau = \frac{\sum_{4\,000}^{7\,000} E\lambda\rho_a\Delta\lambda}{\sum_{4\,000}^{7\,000} E\lambda\Delta\lambda} = \frac{741,85}{1\,062,68} = 0,697$$

TABLEAU VIII

Nature de la Lumière		Sensation de Rouge	Sensation de Vert	Sensation de Bleu	Longueur d'onde de la radiation de luminosité maximum Angströms	Longueur d'onde de la radiation dominante Angströms	Facteur de pureté
Lumière du Corps noir à la température de 2 850 degrés absolus		0,448	0,382	0,170	5710	5845	0,51
Après avoir été réfléchie par un miroir en :	Or	0,504	0,397	0,099	5760	5858	0,72
	Cuivre	0,502	0,380	0,118	5860	5885	0,66
	Or rouge	0,495	0,382	0,123	5830	5879	0,65
	Or vert	0,487	0,400	0,113	5740	5843	0,67
	Argent	0,455	0,384	0,161	5710	5846	0,53
Après avoir été réfléchie par un miroir en argent et transmise par une ampoule de couleur :	Bleu clair	0,367	0,369	0,264	5620	5720	0,22
	Jaune citron	0,543	0,435	0,022	5730	5830	0,97
	Jaune orangé	0,563	0,413	0,024	5750	5866	0,96
	Orangé rouge	0,649	0,339	0,012	5930	5985	0,98
	Rouge cerise	0,729	0,268	0,003	6150	6120	1,00

TABLEAU IX

Facteurs totaux de réflexion et de transmission calculés d'après :		la luminosité totale	les sensations colorées totales
Facteurs de réflexion des miroirs pour la lumière du corps noir à la température de 2850 degrés absolus	Or	0,697	0,700
	Cuivre	0,650	0,654
	Or rouge	0,548	0,551
	Or vert	0,508	0,509
	Argent	0,852	0,854
Facteurs de transmission des ampoules pour la lumière du corps noir à la température de 2850 degrés absolus après réflexion sur un miroir en argent	Bleu clair	0,378	0,375
	Jaune citron	0,798	0,799
	Jaune orangé	0,748	0,747
	Orangé rouge	0,433	0,440
	Rouge cerise	0,232	0,246

b) d'après les sensations colorées.

Les facteurs s'obtiennent en multipliant les sensations rouge, verte et bleue, par 0,568, 0,426, 0,006, coefficients déterminés par IVES pour que la somme des sensations colorées totales soit égale à la luminosité totale.

Par exemple, pour l'or, nous avons :

$$\tau = \frac{0,568 \sum_{4000}^{7000} ER_p \Delta\lambda + 0,426 \sum_{4000}^{7000} EV_p \Delta\lambda + 0,006 \sum_{4000}^{7000} EB_p \Delta\lambda}{0,568 \sum_{4000}^{7000} ER \Delta\lambda + 0,426 \sum_{4000}^{7000} EV \Delta\lambda + 0,006 \sum_{4000}^{7000} EB \Delta\lambda}$$

$$\tau = \frac{0,568 \times 422,77 + 0,426 \times 332,48 + 0,006 \times 82,66}{0,568 \times 585,88 + 0,426 \times 498,74 + 0,006 \times 222,65} = 0,700$$

Cette seconde méthode est moins précise que la première car les courbes des sensations colorées ⁽¹⁾ sont moins bien connues que celle de la luminosité.

(1) H.E. Ives. — Journal of the Franklin Institute, t. 195, p. 43, 1923.

La concordance entre les résultats trouvés par l'une et par l'autre méthode est très bonne pour tous les verres transmettant une lumière dont la radiation de luminosité maximum est dans le milieu du spectre visible, par contre pour les verres transmettant une lumière dont la luminosité maximum est dans le bleu ou dans le rouge, on constate une discordance de l'ordre de 5 à 10 %.

Les facteurs déterminés d'après les sensations colorées sont pour les verres bleus plus faibles que ceux déterminés par la luminosité ; l'inverse a lieu pour les verres rouges, l'écart dans ce cas étant nettement plus accentué.

Deux remarques importantes semblent se dégager des tableaux VIII et IX :

1° les longueurs d'onde des radiations dominantes sont, ainsi que les facteurs de pureté, sensiblement les mêmes pour les divers métaux. Dans ces conditions, on ne peut espérer obtenir avec des réflecteurs en or ou en cuivre des résultats très différents de ceux qu'on obtient avec un réflecteur en argent ;

2° les longueurs d'onde des radiations dominantes sont également peu différentes pour les verres colorés, par contre les facteurs de pureté varient dans de grandes proportions. Or, le facteur de pureté doit être aussi grand que possible pour que les effets physiques et physiologiques soient marqués.

Seul le verre jaune citron possède la propriété de présenter simultanément un facteur de pureté voisin de l'unité, un facteur de transmission élevé, et une radiation dominante voisine de la radiation de visibilité maximum.

Les tableaux X à XIII sont relatifs aux caractéristiques des verres colorés qui nous ont servi à l'étalonnement du photomètre et à la détermination des seuils de perceptibilité différentielle ; elles ont été déterminées pour la température de 2 360 degrés absolus facilement reproductible à l'aide des lampes étalons du Laboratoire Central d'Electricité.

Les remarques faites en ce qui concerne les facteurs de transmission des verres d'ampoules s'appliquent également à ces verres colorés.

TABLEAU X

λ	CORPS NOIR A 2360 DEGRÉS ABSOLUS				
	E	EA	ER	EV	EB
4000	7,0	0,01	0,07		1,30
4100	9,0	0,03	0,14		2,87
4200	11,3	0,11	0,21		5,45
4300	14,1	0,25	0,21		10,47
4400	17,4	0,50	0,14	0,09	16,16
4500	21,1	0,86	0,00	0,36	20,01
4600	25,3	1,47	0,02	0,96	21,92
4700	30,1	2,71	0,30	2,02	21,21
4800	35,5	4,90	0,78	3,87	16,36
4900	41,5	8,92	2,57	6,85	9,67
5000	48,0	16,38	5,91	11,71	5,91
5100	55,2	27,23	10,98	19,09	4,47
5200	62,9	40,13	17,28	28,50	3,33
5300	71,3	56,68	24,25	37,44	2,64
5400	80,2	73,70	32,00	45,62	2,24
5500	89,8	89,08	39,60	51,80	1,97
5600	100,0	99,90	46,60	55,40	1,70
5700	110,7	105,50	52,08	54,73	1,55
5800	122,0	107,24	56,39	48,06	1,22
5900	133,8	103,96	58,60	38,40	0,67
6000	146,1	92,48	58,15	28,92	0,29
6100	158,7	77,92	55,28	21,11	0,16
6200	171,7	62,15	49,62	15,81	
6300	185,2	44,45	39,65	10,37	
6400	199,0	32,64	30,44	6,77	
6500	213,0	21,51	20,44	3,83	
6600	227,4	13,64	13,18	2,27	
6700	242,1	9,20	8,23	1,21	
6800	256,9	5,65	3,85	0,51	
6900	271,6	3,53	2,71	0,27	
7000	286,7	2,01	1,43		
Sommes		1104,74	631,11	495,97	151,57

TABLEAU XI

λ	VERRE BLEU CLAIR				VERRE JAUNE BRUN				VERRE ROUGE CLAIR			
	τ	EA τ	ER τ	EB τ	τ	EA τ	ER τ	EB τ	τ	EA τ	ER τ	EB τ
4200	0,785	0,08	0,16	4,27	0,013	0,01		0,26	0,005	0,01		0,11
4300	0,780	0,19	0,16	8,17	0,020	0,03		0,44	0,008	0,04		0,13
4400	0,771	0,38	0,11	12,45	0,034	0,09	0,01	0,72	0,013	0,01	0,01	0,09
4500	0,762	0,65	0,00	15,23	0,056	0,27	0,04	0,92	0,021	0,12	0,03	0,12
4600	0,750	1,10	0,01	16,43	0,082	0,73	0,21	0,79	0,034	0,34	0,12	0,25
4700	0,730	1,98	0,22	15,47	0,115	1,88	0,68	0,68	0,034	0,93	0,37	0,65
4800	0,705	3,45	0,55	11,52	0,152	4,14	1,67	0,66	0,055	2,21	0,95	0,15
4900	0,670	5,98	1,72	6,42	0,198	7,95	3,42	0,66	0,075	4,25	1,82	0,18
5000	0,623	10,19	3,68	3,68	0,250	14,17	6,06	0,66	0,096	7,08	3,07	0,20
5100	0,572	15,56	6,28	2,55	0,300	21,10	9,60	0,67	0,125	11,14	4,95	0,21
5200	0,534	21,40	9,22	1,78	0,344	30,66	13,62	0,68	0,155	15,48	7,22	0,25
5300	0,515	29,16	12,47	1,36	0,385	38,46	17,94	0,65	0,193	20,36	10,05	0,30
5400	0,517	38,08	16,53	1,17	0,425	44,85	22,14	0,66	0,288	30,88	16,24	0,35
5500	0,535	47,65	21,17	1,05	0,455	48,79	25,63	0,55	0,515	53,54	30,17	0,34
5600	0,545	54,44	25,39	0,93	0,484	50,32	28,36	0,32	0,710	65,66	41,29	0,21
5700	0,527	55,60	27,44	0,82	0,506	46,80	29,41	0,15	0,822	62,08	44,06	0,13
5800	0,472	50,62	26,60	0,58	0,525	40,90	29,03	0,08	0,828	51,10	40,80	
5900	0,410	42,60	24,01	0,27	0,551	33,55	26,80		0,832	36,80	32,83	
6000	0,410	37,91	23,82	0,12	0,560	24,49	21,85		0,833	27,15	25,33	
6100	0,428	33,34	23,66	0,12	0,568	18,28	17,05		0,834	17,91	17,02	
6200	0,433	26,90	21,46	0,07	0,575	12,21	11,61		0,835	11,37	10,98	
6300	0,423	18,80	16,76	6,84	0,580	7,84	7,57		0,835	7,68	6,87	
6400	0,415	13,55	12,63	4,39	0,585	5,33	4,77		0,835	4,72	3,21	
6500	0,418	8,99	8,55	2,81	0,588	3,30	2,25		0,835	2,95	2,26	
6600	0,436	5,95	5,75	0,99	0,590	2,07	1,59		0,835	1,68	1,19	
6700	0,495	4,55	4,07	0,60		1,18	0,84					
6800	0,580	3,27	2,23	0,29								
6900	0,640	2,26	1,73	0,17								
7000	0,690	1,38	0,99									
Sommes		536,01	297,37	104,34		459,40	282,15	9,57		435,28	300,84	3,07
							184,93				140,44	

TABLEAU XII

λ	VERRE BLEU FONCÉ				VERRE JAUNE CITRON				VERRE ROUGE FONCÉ						
	τ	E.A.	ER.	EV.	EB.	τ	E.A.	ER.	EV.	EB.	τ	E.A.	ER.	EV.	EB.
4200	0,815	0,09	0,17		4,44	0,011	0,03		0,02	0,23	0,001	0,08	0,05	0,02	
4300	0,760	0,19	0,16		7,96	0,023	0,11		0,09	0,37	0,016	0,99	0,78	0,25	
4400	0,700	0,35	0,10	0,06	11,31	0,060	0,53		0,15	0,58	0,157	6,98	6,23	1,63	
4500	0,630	0,54	0,00	0,23	12,61	0,205	3,36		1,21	1,21	0,490	15,99	14,92	3,32	
4600	0,537	0,79	0,01	0,52	11,77	0,485	13,21		5,32	2,17	0,710	15,26	14,51	2,72	
4700	0,415	1,12	0,12	0,84	8,80	0,700	28,08		12,08	19,93	0,820	11,18	10,80	1,86	
4800	0,290	1,42	0,23	1,12	4,75	0,023	0,11		0,02	0,09	0,835	7,69	6,87	1,01	
4900	0,175	1,56	0,45	1,20	1,69	0,060	0,53		0,15	0,41	0,840	4,74	3,23	0,43	
5000	0,110	1,80	0,65	1,29	0,65	0,205	3,36		1,21	1,21	0,843	2,97	2,28	0,23	
5100	0,061	1,66	0,67	1,16	0,27	0,485	13,21		5,32	2,17	0,845	1,70	1,21		
5200	0,035	1,40	0,60	0,99	0,12	0,700	28,08		12,08	19,93					
5300	0,020	1,13	0,48	0,75	0,05	0,790	44,79		19,15	29,57					
5400	0,021	1,55	0,67	0,96	0,05	0,830	61,20		26,55	37,87					
5500	0,034	3,03	1,35	1,76	0,07	0,841	74,91		33,30	43,55					
5600	0,045	4,49	2,09	2,49	0,08	0,845	84,41		39,38	47,80					
5700	0,028	2,95	1,46	1,53	0,04	0,848	89,46		44,16	46,40					
5800	0,008	0,86	0,45	0,38	0,01	0,850	91,15		47,95	40,85					
5900	0,003	0,31	0,18	0,11		0,852	88,57		49,90	32,70					
6000	0,003	0,28	0,17	0,09		0,854	79,00		49,64	24,70		0,001	0,05	0,02	
6100	0,004	0,31	0,22	0,08		0,856	66,70		47,34	18,08		0,016	0,78	0,25	
6200	0,005	0,31	0,25	0,08		0,858	53,32		42,60	13,56		0,157	6,23	1,63	
6300	0,004	0,18	0,16	0,04		0,859	38,17		34,05	8,91		0,490	14,92	3,32	
6400	0,003	0,10	0,09	0,02		0,860	28,07		26,18	5,82		0,710	15,26	2,72	
6500	0,003	0,06	0,06	0,01		0,860	18,50		17,57	3,29		0,820	11,18	1,86	
6600	0,006	0,08	0,08	0,01		0,859	11,71		11,32	1,95		0,835	7,69	6,87	
6700	0,016	0,14	0,13	0,02		0,857	7,88		7,05	1,03		0,840	4,74	3,23	
6800	0,052	0,29	0,20	0,03		0,855	4,83		3,29	0,43		0,843	2,97	2,28	
6900	0,157	0,55	0,43	0,04		0,852	3,01		2,31	0,23		0,845	1,70	1,21	
7000	0,361	0,72	0,52			0,848	1,70		1,21						
Sommes		28,26	12,15	15,81	64,67		892,70		521,73	388,86		67,58	60,88	11,47	

TABLEAU XIII

Nature de la lumière		Sensation de Rouge	Sensation de Vert	Sensation de Bleu	Longueur d'onde de la radiation dominante Angströms	Facteur de pureté	Facteur de transmission calculé d'après la luminosité totale	Facteur de transmission calculé d'après les sensations colorées totales
Lumière du Corps noir à la température de 2 360 degrés absolus		0,494	0,388	0,118	5870	0,66		
Après avoir été transmise par le verre :	Bleu clair	0,457	0,383	0,160	5852	0,54	0,485	0,484
	Jaune brun	0,592	0,388	0,020	5907	0,97	0,416	0,419
	Rouge clair	0,677	0,316	0,007	6028	0,99	0,394	0,404
	Bleu foncé	0,131	0,171	0,698	4690	0,62	0,025	0,024
	Jaune citron	0,563	0,419	0,018	5859	0,98	0,809	0,810
	Rouge foncé	0,842	0,158	0,000	6500	1,00	0,061	0,069

Les tableaux XIV à XVII sont relatifs aux écrans absorbants dits neutres, utilisés pour accroître l'étendue des mesures du photomètre. Ces écrans présentant une certaine sélectivité, nous avons jugé utile de déterminer les facteurs de transmission de chacun d'eux lorsqu'ils sont placés devant la source de lumière expérimentée ou devant la plage de comparaison du photomètre. La figure 28 représente les courbes de transmission spectrale de chaque écran.

TABLEAU XIV

ECRAN NEUTRE 1/10

λ	τ_e	OR	CUIVRE	ARGENT	VERRE BLEU CLAIR	VERRE JAUNE CITRON	VERRE JAUNE ORANGÉ	VERRE ROUGE CERISE	VERRE BLEU CLAIR	VERRE JAUNE BRUN	VERRE ROUGE CLAIR
		$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$	$E_{\lambda_{pre}}$
4000	0,100	0,00	0,00	0,00					0,00		
4100	0,097	0,00	0,00	0,00					0,02		
4200	0,094	0,01	0,01	0,01	0,01		0,00		0,04	0,00	
4300	0,092	0,01	0,01	0,03	0,03		0,00		0,07	0,00	
4400	0,102	0,03	0,03	0,06	0,06		0,01		0,12	0,01	0,00
4500	0,105	0,04	0,06	0,10	0,11		0,02		0,23	0,03	0,00
4600	0,114	0,09	0,10	0,20	0,16		0,05		0,37	0,07	0,01
4700	0,115	0,16	0,19	0,36	0,27	0,00	0,10	0,00	0,57	0,16	0,03
4800	0,107	0,28	0,31	0,58	0,42	0,00	0,22	0,00	0,90	0,35	0,08
4900	0,095	0,47	0,50	0,91	0,60	0,05	0,45	0,01	1,30	0,65	0,18
5000	0,088	0,83	0,84	1,48	0,89	0,42	0,80	0,05	2,65	1,29	0,39
5100	0,084	1,40	1,31	2,28	1,25	1,47	1,91	0,13	3,89	2,15	0,72
5200	0,082	2,09	1,86	3,17	1,57	2,44	2,45	0,29	5,48	3,52	1,28
5300	0,091	3,43	2,94	4,87	2,18	3,96	4,50	0,41	5,88	4,15	1,67
5400	0,102	5,06	4,20	6,81	2,93	5,62	7,30	0,62	5,96	4,81	2,18
5500	0,115	7,04	5,72	9,01	3,97	7,46	8,18	0,97	5,48	5,28	3,34
5600	0,108	7,55	6,19	9,20	4,19	7,65	8,12	1,65	4,94	5,84	6,21
5700	0,107	7,92	6,99	9,33	3,97	7,30	8,33	2,79	4,36	5,38	7,55
5800	0,108	8,05	7,53	9,30	3,26	7,78	8,33	3,08	3,23	3,96	6,02
5900	0,116	8,30	8,17	9,42	2,62	7,92	8,33	2,22	2,37	2,95	4,49
6000	0,115	7,22	7,31	6,90	2,10	6,80	7,17	1,77	1,58	2,06	3,09
6100	0,097	5,06	5,21	5,60	1,48	4,98	5,33	1,83	1,22	1,64	2,44
6200	0,088	3,62	3,75	5,46	1,04	3,35	3,53	0,81	0,83	1,12	1,64
6300	0,084	2,44	2,51	2,63	0,64	2,23	2,35	0,54	0,60	0,79	1,15
6400	0,090	1,89	1,93	2,02	0,43	1,72	1,80	0,32	0,47	0,55	0,79
6500	0,092	1,26	1,27	1,33	0,28	1,13	1,18	0,20	0,33	0,34	0,48
6600	0,101	0,87	0,87	0,91	0,15	0,77	0,80	0,11	0,24	0,22	0,31
6700	0,103	0,59	0,58	0,61	0,10	0,52	0,54	0,11	0,14	0,12	0,17
6800	0,102	0,35	0,34	0,36	0,07	0,19	0,20				
6900	0,105	0,22	0,22	0,23	0,04	0,10	0,11				
7000	0,103	0,12	0,12	0,12							
Sommes		76,40	71,07	93,30	34,99	73,91	70,78	20,57	55,02	47,44	44,22

TABLEAU XV

ECRAN NEUTRE 1/100

λ	τ_e	OR	CUIVRE	ARGENT	VERRE BLEU CLAIR	VERRE CITRON	VERRE JAUNE ORANGÉ	VERRE ROUGE CERISE	VERRE BLEU CLAIR	VERRE JAUNE BRUN	VERRE ROUGE CLAIR
		$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$	$E_{\lambda pte}$
4000	0,0075	0,000	0,000	0,000					0,000		
4100	0,0070	0,000	0,000	0,000					0,001		
4200	0,0062	0,000	0,000	0,001	0,001				0,003		
4300	0,0075	0,001	0,001	0,003	0,002				0,007	0,000	
4400	0,0091	0,002	0,003	0,006	0,005		0,000		0,014	0,000	
4500	0,0111	0,005	0,006	0,012	0,010		0,001		0,028	0,001	
4600	0,0129	0,010	0,012	0,023	0,018		0,003		0,044	0,003	0,000
4700	0,0144	0,021	0,024	0,045	0,034		0,006		0,067	0,008	0,001
4800	0,0159	0,034	0,048	0,070	0,051		0,012		0,100	0,018	0,003
4900	0,0172	0,055	0,059	0,106	0,071	0,006	0,025	0,000	0,138	0,037	0,008
5000	0,0098	0,093	0,093	0,165	0,100	0,047	0,083	0,001	0,182	0,067	0,019
5100	0,0089	0,148	0,139	0,242	0,132	0,156	0,214	0,006	0,298	0,144	0,043
5200	0,0085	0,216	0,192	0,329	0,163	0,254	0,214	0,002	0,469	0,260	0,087
5300	0,0102	0,385	0,329	0,548	0,245	0,444	0,543	0,016	0,662	0,426	0,155
5400	0,0123	0,611	0,506	0,822	0,353	0,678	0,882	0,035	0,681	0,480	0,194
5500	0,0139	0,851	0,692	1,090	0,480	0,902	0,904	0,048	0,657	0,530	0,240
5600	0,0125	0,874	0,717	1,064	0,485	0,886	0,896	0,068	0,648	0,625	0,395
5700	0,0118	0,874	0,771	1,030	0,438	0,860	0,896	0,116	0,654	0,654	0,696
5800	0,0128	0,955	0,895	1,101	0,386	0,923	0,970	0,185	0,478	0,520	0,828
5900	0,0130	0,931	0,915	1,056	0,294	0,887	0,934	0,305	0,344	0,422	0,640
6000	0,0126	0,791	0,802	0,886	0,230	0,745	0,785	0,363	0,292	0,292	0,444
6100	0,0103	0,537	0,554	0,595	0,158	0,503	0,530	0,304	0,150	0,196	0,294
6200	0,0087	0,358	0,371	0,391	0,102	0,331	0,349	0,116	0,122	0,164	0,244
6300	0,0080	0,232	0,239	0,251	0,062	0,213	0,229	0,177	0,092	0,124	0,183
6400	0,0090	0,189	0,193	0,201	0,043	0,171	0,180	0,130	0,068	0,090	0,131
6500	0,0102	0,140	0,141	0,147	0,031	0,126	0,131	0,092	0,060	0,071	0,102
6600	0,0115	0,099	0,098	0,103	0,022	0,088	0,092	0,070	0,042	0,042	0,060
6700	0,0133	0,076	0,075	0,078	0,020	0,067	0,069	0,040	0,029	0,026	0,038
6800	0,0128	0,044	0,043	0,045	0,013	0,039	0,040	0,025	0,018	0,015	0,021
6900	0,0128	0,027	0,026	0,028	0,009	0,024	0,024	0,014			
7000	0,0128	0,015	0,015	0,015	0,006	0,013	0,013				
Sommes		8,574	7,959	10,453	3,964	8,363	7,962	2,209	6,190	5,285	4,828

TABLEAU XVI

ECRAN NEUTRE 1/1000

λ	τ_e	OR $E_{\lambda_{\text{pre}}}$	CUIVRE $E_{\lambda_{\text{pre}}}$	ARGENT $E_{\lambda_{\text{plate}}}$	VERRE BLEU CLAIR $E_{\lambda_{\text{plate}}}$	VERRE JAUNE CITRON $E_{\lambda_{\text{plate}}}$	VERRE JAUNE ORANGÉ $E_{\lambda_{\text{plate}}}$	VERRE ROUGE CERISE $E_{\lambda_{\text{plate}}}$	VERRE BLEU CLAIR $E_{\lambda_{\text{pre}}}$	VERRE JAUNE BRUN $E_{\lambda_{\text{pre}}}$	VERRE ROUGE CLAIR $E_{\lambda_{\text{pre}}}$
4000	0,00085	0,0000	0,0000	0,0000					0,0000		
4100	0,00079	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001				0,0001		
4200	0,00072	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002				0,0003		
4300	0,00070	0,0001	0,0001	0,0002	0,0005				0,0007		
4400	0,00086	0,0002	0,0003	0,0005	0,0004				0,0015	0,0000	
4500	0,00105	0,0005	0,0006	0,0011	0,0010				0,0030	0,0001	0,0000
4600	0,00137	0,0010	0,0012	0,0025	0,0019				0,0042	0,0006	0,0003
4700	0,00151	0,0022	0,0025	0,0047	0,0036	0,0000			0,0051	0,0014	0,0003
4800	0,00123	0,0032	0,0036	0,0067	0,0048	0,0000			0,0078	0,0027	0,0006
4900	0,00086	0,0043	0,0045	0,0082	0,0055	0,0004			0,0101	0,0050	0,0035
5000	0,00076	0,0072	0,0072	0,0128	0,0077	0,0036		0,0000	0,0135	0,0245	0,0082
5100	0,00065	0,0108	0,0101	0,0176	0,0097	0,0114	0,0034	0,0001	0,0164	0,0380	0,0138
5200	0,00063	0,0160	0,0143	0,0243	0,0121	0,0188	0,0061	0,0002	0,0184	0,0420	0,0169
5300	0,00084	0,0317	0,0271	0,0451	0,0201	0,0365	0,0176	0,0005	0,0227	0,0440	0,0199
5400	0,00116	0,0576	0,0477	0,0775	0,0333	0,0639	0,0512	0,0015	0,0492	0,0474	0,0300
5500	0,00124	0,0760	0,0618	0,0972	0,0429	0,0805	0,0787	0,0031	0,0591	0,0579	0,0616
5600	0,00109	0,0762	0,0625	0,0928	0,0423	0,0772	0,0789	0,0042	0,0594	0,0445	0,0624
5700	0,00098	0,0726	0,0641	0,0856	0,0363	0,0713	0,0743	0,0056	0,0545	0,0278	0,0422
5800	0,00097	0,0723	0,0677	0,0835	0,0292	0,0700	0,0735	0,0088	0,0490	0,0184	0,0281
5900	0,00115	0,0824	0,0810	0,0935	0,0260	0,0785	0,0827	0,0135	0,0096	0,0125	0,0187
6000	0,00095	0,0598	0,0605	0,0668	0,0174	0,0563	0,0592	0,0231	0,0084	0,0113	0,0168
6100	0,00068	0,0354	0,0366	0,0392	0,0104	0,0332	0,0350	0,0240	0,0076	0,0104	0,0152
6200	0,00055	0,0226	0,0234	0,0247	0,0065	0,0209	0,0221	0,0193	0,0148	0,0084	0,0123
6300	0,00051	0,0148	0,0152	0,0160	0,0039	0,0135	0,0143	0,0063	0,0064	0,0064	0,0092
6400	0,00062	0,0130	0,0133	0,0139	0,0030	0,0118	0,0124	0,0039	0,0041	0,0027	0,0039
6500	0,00085	0,0116	0,0117	0,0123	0,0025	0,0105	0,0109	0,0026	0,0017	0,0015	0,0021
6600	0,00108	0,0093	0,0092	0,0097	0,0020	0,0083	0,0086	0,0063			
6700	0,00120	0,0068	0,0067	0,0071	0,0018	0,0061	0,0063	0,0063			
6800	0,00125	0,0043	0,0042	0,0044	0,0013	0,0038	0,0039	0,0039			
6900	0,00133	0,0028	0,0027	0,0029	0,0010	0,0025	0,0025	0,0026			
7000	0,00124	0,0015	0,0014	0,0015	0,0006	0,0013	0,0013	0,0013			
Sommes		0,6962	0,6412	0,8524	0,3275	0,6803	0,6466	0,1660	0,5059	0,4238	0,3731

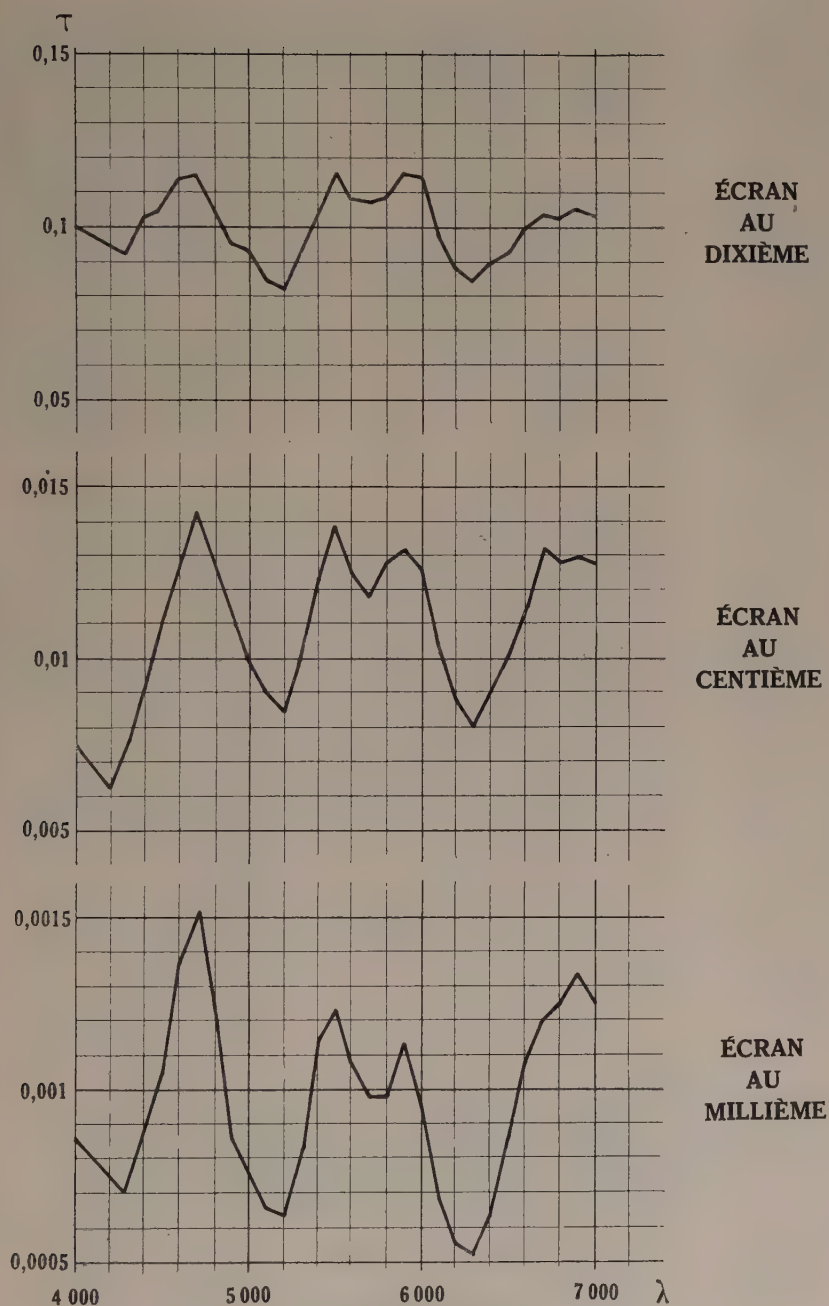


Fig. 28. — Courbes de transmission spectrale des écrans absorbants du photomètre.

TABLEAU XVII

Facteur de transmission des écrans neutres :		1/10	1/100	1/1000
lorsqu'ils sont utilisés devant la source de lumière à expérimenter	Or	0,1030	0,01155	0,000939
	Cuivre	0,1025	0,01150	0,000927
	Argent	0,1030	0,01155	0,000941
	Bleu clair	0,1020	0,01155	0,000958
	Jaune citron	0,1025	0,01155	0,000942
	Jaune orangé	0,1045	0,01175	0,000954
	Rouge cerise	0,0980	0,01050	0,000810
lorsqu'ils sont utilisés devant la lampe étalon du photomètre avec les verres colorés	Bleu clair	0,1025	0,01155	0,000940
	Jaune brun	0,1030	0,01150	0,000922
	Rouge clair	0,1015	0,01105	0,000856

b) Caractéristiques géométriques des lampes et des projecteurs.

Les projecteurs avaient une distance focale de 32 millimètres et un diamètre d'ouverture de 20 centimètres.

Le filament incandescent des lampes que nous avons utilisées était constitué par un fil de tungstène de 0,185 millimètre de diamètre spiralé sur un mandrin cylindrique.

La longueur du boudin ainsi réalisé était de 4,5 millimètre et son diamètre extérieur de 0,87 millimètre.

Ce filament était disposé dans l'ampoule perpendiculairement à l'axe du culot et à une distance de 26,2 millimètres du plan de portée des ergots sur les encoches du projecteur.

Sous une tension de 6 volts, l'intensité lumineuse maximum était de 79 bougies décimales.

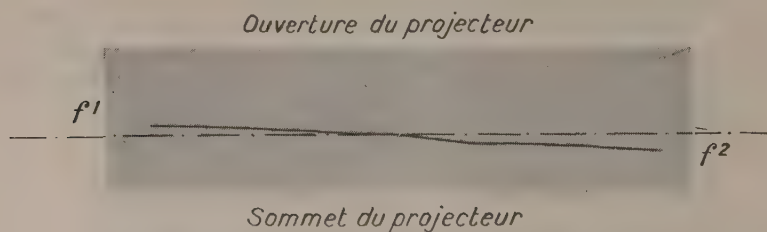


Fig. 29. — Photographie de l'aberration d'un projecteur.

TABLEAU XVIII

RÉPARTITION LUMINEUSE D'UN PROJECTEUR DANS LEQUEL ÉTAIT PLACÉ UNE LAMPE A AMPOULE INCOLORE

Distances en cm	250	225	200	175	150	125	100	75	50	25	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	Distances en cm
150	2,3	2,8	3,3	4,2	5,3	6,8	8,5	11,0	12,0	12,5	13,5	12,5	11,0	9,5	6,5	5,0	4,0	3,3	2,7	2,2	1,9	150
125	2,5	3,1	3,8	5,0	7,0	9,0	10,0	14,0	17,0	19,0	20,0	19,0	18,0	15,5	9,0	7,0	5,2	3,8	3,0	2,5	2,2	125
100	2,9	3,5	4,5	6,0	8,0	11,5	15,5	19,5	24,0	27,0	30,0	27,5	25,0	20,0	15,5	11,0	8,0	6,0	4,5	3,6	2,7	100
75	3,1	4,0	5,3	7,5	10,5	14,5	20,0	27,0	32,0	38,0	43,0	39,0	35,0	27,0	21,0	16,5	10,8	7,4	5,3	3,8	2,8	75
50	3,2	4,2	5,8	8,3	13,5	18,5	25,0	36,0	46,0	53,0	58,0	52,0	46,0	33,0	25,0	17,0	12,5	8,6	5,4	4,1	2,9	50
25	3,5	4,8	6,5	9,6	14,5	23,0	25,0	42,0	52,0	62,0	68,0	65,0	55,0	45,0	31,0	21,0	14,0	10,0	6,7	4,8	3,6	25
0	3,7	4,7	6,4	9,2	14,0	21,0	32,0	42,0	54,0	61,0	70,0	62,0	50,0	40,0	29,0	20,0	13,5	8,5	6,0	4,4	3,7	0
25	3,4	4,4	5,6	8,5	13,5	18,0	27,0	37,0	45,0	56,0	61,0	59,0	48,0	40,0	26,0	18,0	13,0	8,0	6,0	4,3	3,5	25
50	3,0	3,8	5,8	8,0	11,2	15,2	22,0	30,0	34,0	39,0	41,0	39,0	33,5	26,0	25,0	16,6	11,6	7,6	5,4	4,1	3,1	50
75	2,6	3,3	4,7	6,1	8,7	12,4	16,7	23,5	29,0	32,5	33,0	32,0	26,5	21,5	15,5	12,4	8,6	6,1	4,0	3,1	2,7	75
100	2,1	2,9	4,1	5,2	7,7	10,5	13,7	18,6	23,5	26,5	30,0	28,0	24,0	21,0	16,5	12,2	9,0	6,3	4,9	4,6	3,2	100
Distances en cm	250	225	200	175	150	125	100	75	50	25	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	Distances en cm

La figure 29 représente une photographie d'aberration; le point f_1 correspond aux régions du miroir proches du bord et le point f_2 à celles proches du sommet; le réflecteur est plus fermé qu'un paraboloïde.

Les courbes isolux représentées sur la figure 30 sont déduites des mesures d'éclairements faites à l'aide du plan d'épreuve du photomètre WAGUET que l'on déplaçait devant un écran de 5,00 mètres de longueur et de 2,50 mètres de hauteur situé à 25 mètres du projecteur (Tableau XVIII).

Le réseau de courbes était sensiblement le même pour chacun des projecteurs.

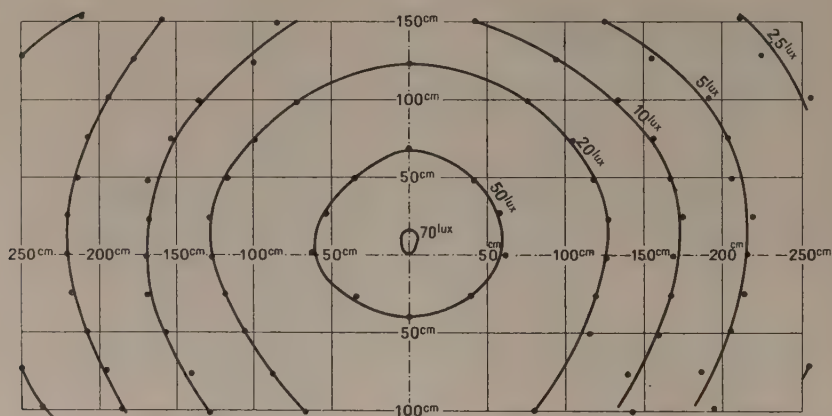


Fig. 30. — Répartition des éclairements produits par un projecteur sur un plan situé à 25 mètres de distance perpendiculairement à l'axe du faisceau.

c) Détermination du seuil de perceptibilité différentielle.

Les tableaux XIX et XX reproduisent les valeurs des seuils différentiels de cinq observateurs et les moyennes de ces seuils pour différentes valeurs de la brillance.

Chaque détermination était précédée d'un certain temps d'adaptation de l'observateur à l'obscurité et était effectuée dans le sens des brillances croissantes.

Le tableau XIX est relatif aux lumières blanche, rouge et bleue ; le tableau XX est relatif aux lumières jaune et orangée.

Ces valeurs sont représentées par les courbes des figures 31 à 35.

TABLEAU XIX

Nature de la lumière	Brillance en bougies par m ²	Seuils différentiels exprimés en pour cent					Moyenne
		Opérateur A	Opérateur B	Opérateur C	Opérateur D	Opérateur E	
BLANCHE	17,3	6,3	2,5	2,5	3,5	3,5	3,6
	8,66	7,5	4,1	3,8	3,8	4,6	4,7
	4,33	7,3	5,8	4,3	4,8	4,8	5,4
	1,73	8,1	3,1	5,0	4,8	5,6	5,3
	0,86	10,0		3,8	4,1	4,9	5,9
	0,173	10,9	4,8	7,9	3,8	5,9	6,6
	0,0346	14,3	5,3	11,0	6,7	8,8	9,1
	0,0086	19,3		21,8	7,7	12,6	15,3
	0,0034	23,1	6,7	28,8	6,9	18,7	16,8
BLEUE	0,433	5,7	4,1	6,8	5,5	4,5	5,3
	0,216	8,9	5,2	6,7	5,1	4,4	6,0
	0,108	7,3	3,9	8,5	2,9	5,8	5,6
	0,0433	8,1	4,6	9,8	4,8	6,9	6,8
	0,0216	9,9	5,7	10,6	9,7	8,6	8,9
	0,0043	10,1	8,3	12,9	10,9	13,4	11,1
	0,00086	13,8	10,5	27,3	14,6	22,4	17,7
	0,00022	19,3	15,3		18,7	32,3	21,4
	0,000086	23,1					23,1
ROUGE	1,06	8,3	3,3	2,2	4,4	4,3	4,5
	0,528	8,8	5,5	5,0	4,1	4,3	5,5
	0,264	9,4	3,8	5,7	2,9	6,3	5,6
	0,106	10,2	4,7	8,0	5,5	6,3	6,9
	0,053	11,9	6,8	9,1	7,2	9,0	8,8
	0,0106	19,5	10,2	14,2	4,9	10,1	11,7
	0,0021	27,0	12,6	25,4	20,7	32,3	23,6
	0,00053		25,6				25,6

La fig. 36 qui représente les courbes des seuils différentiels moyens en fonction de la brillance fait ressortir l'intérêt qu'il y a d'utiliser pour la vision des tests la lumière transmise par le verre jaune au sulfure de cadmium (jaune citron) qui diminue notablement, et principalement pour les faibles brillances, la valeur du seuil différentiel.

TABLEAU XX

Nature de la lumière	Brillance en bougies par m ²	Seuils différentiels exprimés en pour cent					Moyenne
		Opérateur A	Opérateur B	Opérateur C	Opérateur D	Opérateur E	
JAUNE BRUN	7,21	6,4	2,3	2,2	2,2	4,2	3,4
	3,60	6,7	3,5	3,0	3,1	3,8	4,0
	1,82	6,7	3,7	3,8	2,9	4,9	4,4
	0,72	7,5	2,7	3,9	2,7	4,6	4,2
	0,36	8,5	3,5	3,8	4,2	3,3	4,6
	0,072	8,5	5,0	8,1	7,8	4,9	6,8
	0,014	12,8	8,2	10,8	9,6	8,0	9,8
	0,0036	17,7	12,2	24,1	11,6	18,7	16,8
	0,0014	26,0	13,2	33,7	20,0	17,9	22,1
JAUNE CITRON	14,0	4,4	3,8	2,6	3,8	4,0	3,7
	7,00	5,0	3,4	2,8	4,1	4,4	3,9
	3,50	5,3	2,9	2,0	3,6	3,8	3,5
	1,40	6,3	2,9	3,1	3,0	2,9	3,6
	0,700	4,7	2,5		3,9	3,8	3,7
	0,140	6,3	2,7	2,9	5,0	4,9	4,3
	0,028	8,8	4,9	4,0	4,5	4,8	5,4
	0,0028	14,8	7,9	12,2	7,9	9,7	10,5

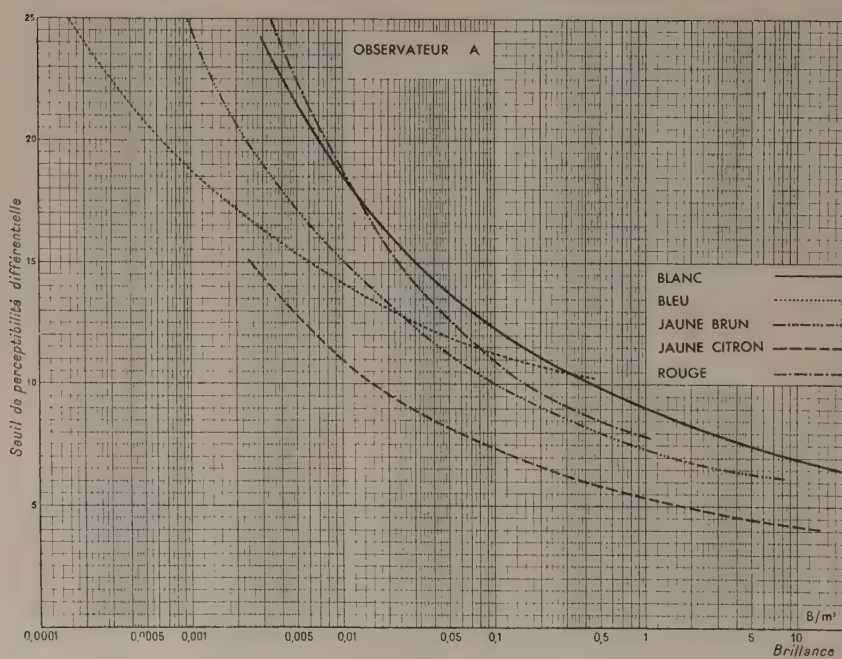


Fig. 31

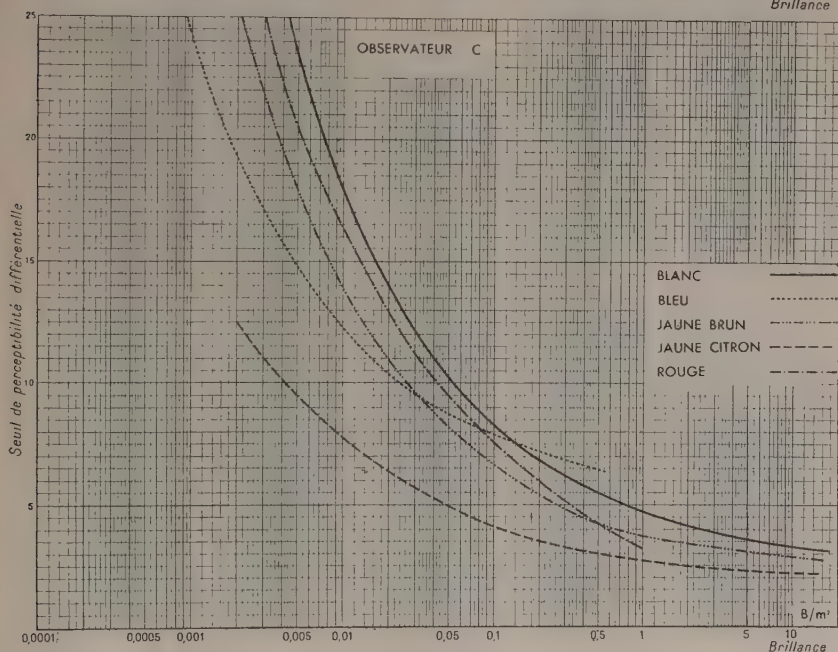
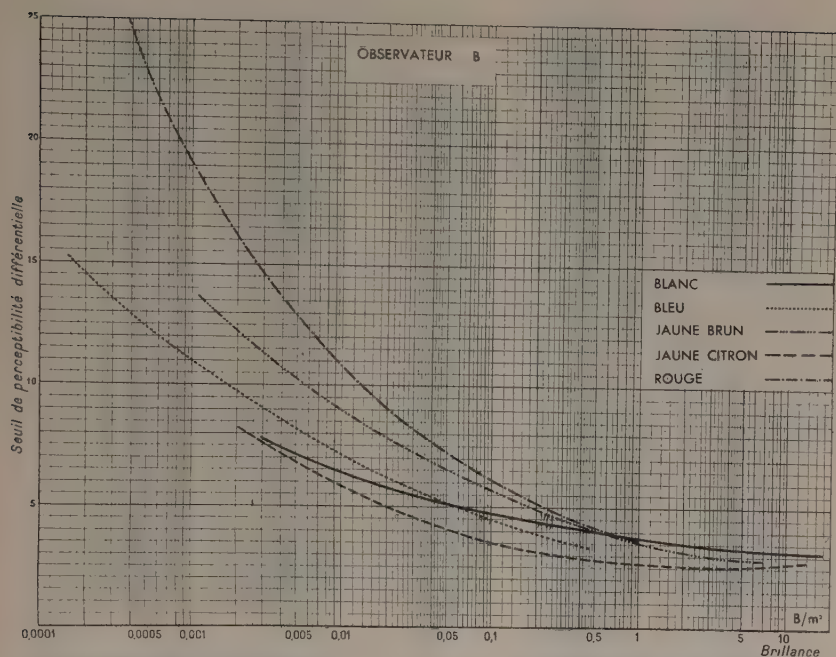


Fig. 32 et 33

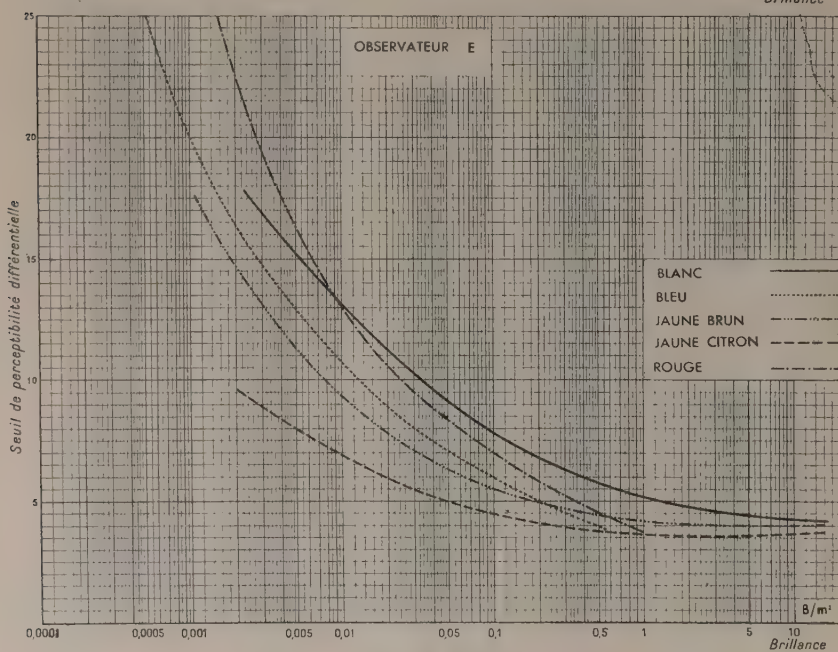
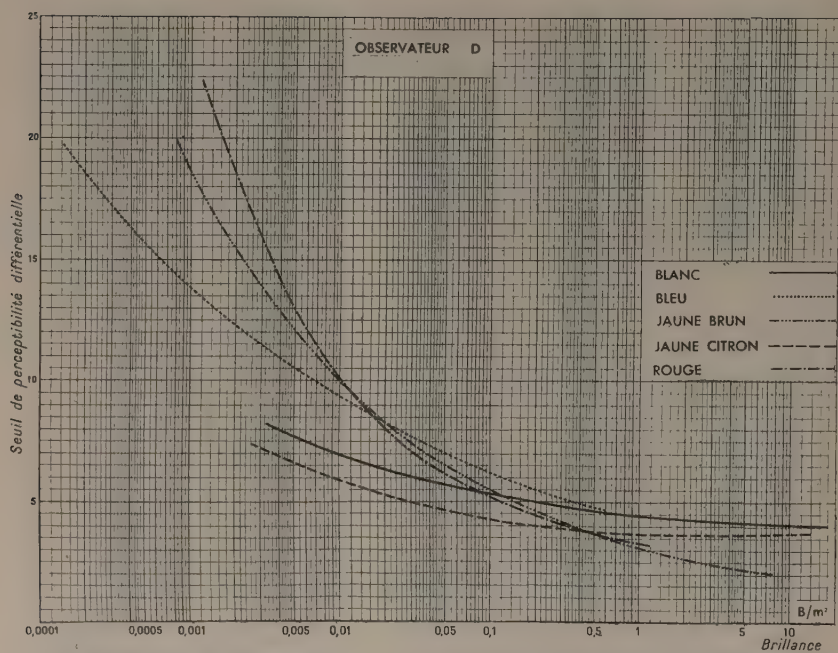


Fig. 34 et 35

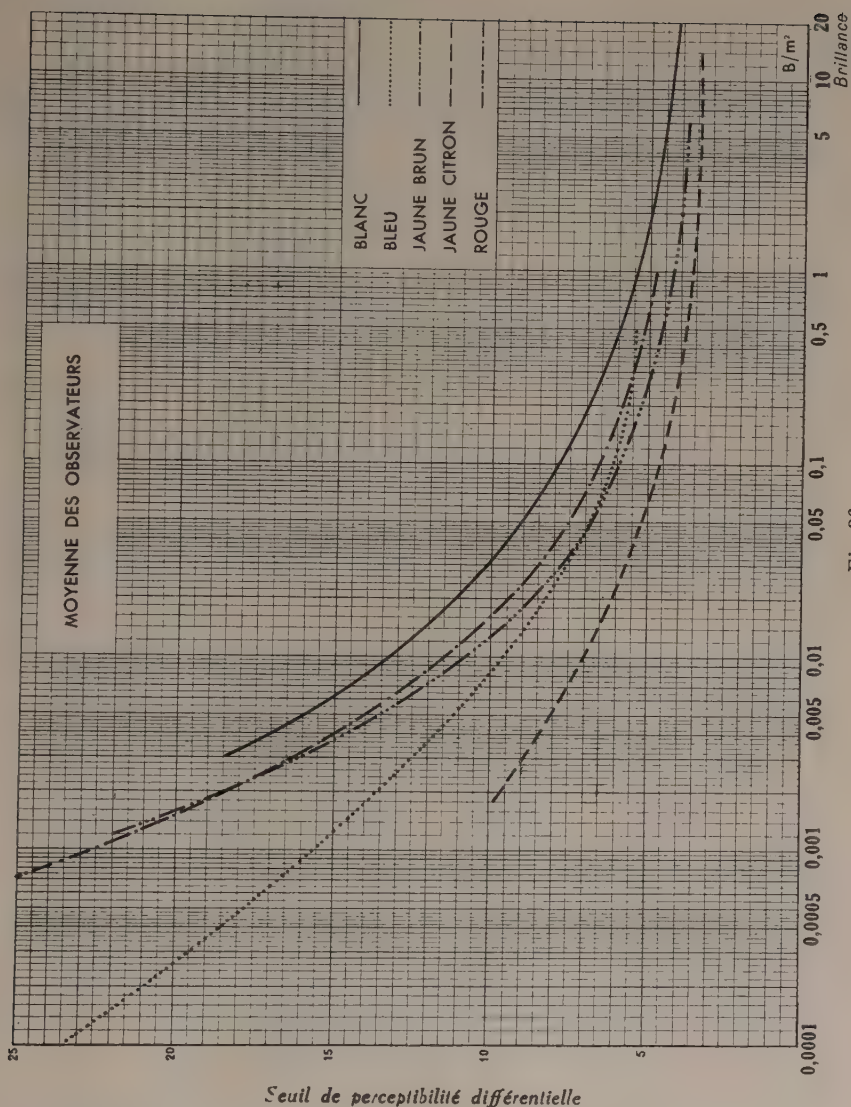


Fig. 36

II. - Détermination des caractéristiques physiques des atmosphères et des conditions météorologiques.

Le tableau XXI mentionne les caractéristiques physiques et les conditions météorologiques des atmosphères étudiées.

Celles-ci sont divisées en deux groupes, l'un relatif aux atmosphères « brumeuses », l'autre aux atmosphères de brouillard.

Par atmosphère « brumeuse » nous entendons, selon la terminologie adoptée par Jean REY et Gabriel GUILBERT, toute atmosphère en apparence limpide, ne déposant pas d'humidité sur les objets, mais contenant toujours des particules d'origine mal connue (poussières, fumées, etc...).

Nous désignons sous le nom de brouillard toute atmosphère, de degré hygrométrique le plus souvent égal à l'unité, contenant en suspension des gouttelettes d'eau pouvant être photographiées.

Nous n'avons retenu, pour figurer dans le présent travail, que six atmosphères « brumeuses » et deux atmosphères de brouillard pour lesquelles nous avons pu enregistrer des résultats complets. Elles sont repérées de A à H dans l'ordre des coefficients de transparence croissants.

Nous considérons que les résultats de ces huit atmosphères, toutes expérimentées de novembre 1935 à mars 1936 dans la région parisienne, constituent les valeurs les plus probables que l'on peut obtenir en hiver dans les atmosphères brumeuses et dans les brouillards de cette région.

Dans le tableau XXI, nous avons noté le lieu de nos essais, l'altitude, l'heure, la direction du vent, la pression barométrique, la température, le degré hygrométrique, la masse d'eau à l'état de vapeur et la masse d'eau totale par mètre cube d'atmosphère.

Le diamètre des particules que nous reproduisons dans ce tableau a été déterminé au moyen des anneaux de diffraction observés en lumière rouge.

TABLEAU XXI

Désignation des atmosphères	Lieu	Heure	Température degrés centésimaux	Pression atmosphérique millibars	Direction du vent	Altitude mètres	Degré hygrométrique	Masse d'eau contenue dans un mètre cube d'atmosphère grammes	Diamètre des particules microns	Temps	Nature du lieu
								calculée	mesurée		
A	Pontcarré	20h à 2h	+13,0	996	Ouest-Est	100	0,77	8,74	9,50	Temps clair	Route découverte
B	Meudon	20h à 2h	+11,0	988	Sud-Nord	180	0,95	9,52	9,26	Temps clair	Route en forêt
C	Meudon	19h à 1h	+ 4,2	1000	Néant	180	0,68	4,45	4,85	Temps clair humide	Route en forêt
D	Meudon	19h à 1h	+ 2,6	995	Néant	180	0,85	4,90	5,09	Temps clair humide	Route en forêt
E	Meudon	20h à 2h	+15,0	986	Néant	180	0,50	6,47	6,93	Tendance au brouillard	Route en forêt
F	Marnes	19h à 1h	+ 9,2	994	Néant	130	0,85	7,70	7,29	Brume légère	Route en forêt
G	Vincennes	23h à 4h	— 1,2	996	Nord-Sud	50	1,00	4,35	4,84	Brouillard léger	Route découverte
H	Villaoublay	20h à 3h	+ 4,4	988	Est-Ouest	160	1,00	6,55	7,13	Brouillard moyen	Route en forêt

Nous avons vérifié dans les brouillards que la méthode des halos de diffraction donnait sensiblement les mêmes diamètres moyens que la méthode d'enregistrement photographique. Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

Désignation des brouillards	Diamètre moyen des particules en microns déterminé :	
	d'après les halos de diffraction	d'après les micro- photographies
G	5,7	5,9
H	15	12

Les figures 37 à 39 représentent les microphotographies des gouttelettes d'eau de ces brouillards immobilisées sur une plaque de verre recouverte d'huile de paraffine.

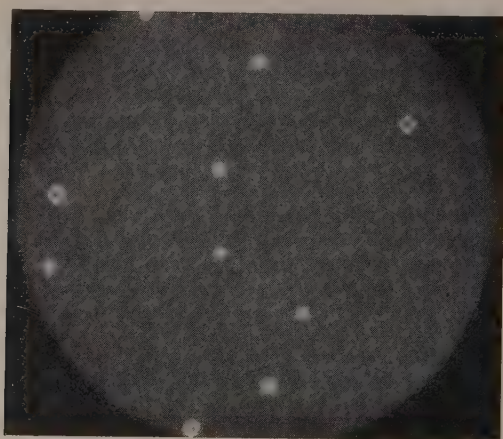


Fig. 37. — Microphotographie des gouttelettes d'eau du brouillard G.
Grossissement linéaire 180



Fig. 33. — Microphotographie des gouttelettes d'eau du brouillard H.
Grossissement linéaire 180

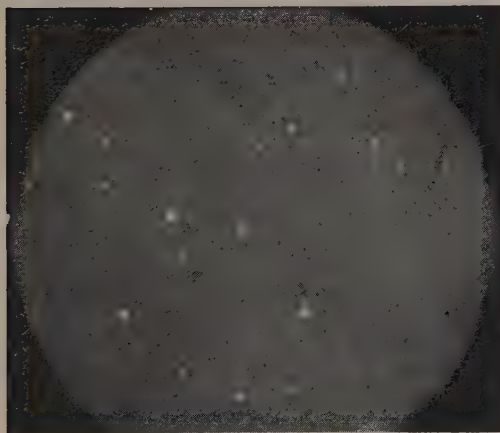


Fig. 39. — Microphotographie des gouttelettes d'eau au moment de la
disparition du brouillard H (même grossissement).

III. - Détermination des propriétés optiques des atmosphères.

a) Mesure du coefficient de transparence.

Les tableaux XXII à XXVII donnent les résultats des atmosphères « brumeuses », les tableaux XXVIII et XXIX ceux des brouillards.

TABLEAU XXII

ATMOSPHÈRE A

$x_1 = 33,33$ m

$x_2 = 300,00$ m

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E ₁	E ₂	$\tau_{x_2 - x_1}$	k_k	τ_k
Blanc (argent)	53400	608	0,922	0,304	0,737
Or	45600	529	0,939	0,235	0,790
Cuivre	34950	412	0,956	0,168	0,844
Bleu clair	23150	262	0,918	0,321	0,725
Jaune citron	35100	419	0,966	0,129	0,878
Jaune orangé	34200	404	0,958	0,159	0,853
Rouge cerise	17000	206	0,981	0,072	0,931

TABLEAU XXIII

ATMOSPHÈRE B

$x_1 = 33,33$ m

$x_2 = 300,00$ m

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E ₁	E ₂	$\tau_{x_2 - x_1}$	k_k	τ_k
Blanc (argent)	44700	483	0,875	0,501	0,606
Or	36200	404	0,905	0,374	0,688
Cuivre	33900	383	0,913	0,342	0,711
Bleu clair	18900	199	0,853	0,596	0,551
Jaune citron	36000	401	0,903	0,383	0,682
Jaune orangé	29650	323	0,883	0,466	0,628
Rouge cerise	14950	178	0,967	0,126	0,881

Dans ces tableaux nous avons indiqué : les éclairagements mesurés en valeurs arbitraires aux distances x_1 et x_2 du projecteur (ces valeurs sont les moyennes de plusieurs séries de mesures comportant chacune dix pointés successifs), le facteur de transmission entre les points correspondants, le coefficient de transparence k_k et le facteur de transmission τ_k kilométriques.

TABLEAU XXIV

ATMOSPHÈRE C

$x_1 = 25,00$ m

$x_2 = 300,00$ m

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E ₁	E ₂	$\tau_{x_2 - x_1}$	k_k	τ_k
Blanc (argent)	137500	818	0,858	0,534	0,586
Or	104100	653	0,904	0,364	0,694
Cuivre	79200	493	0,897	0,391	0,675
Bleu clair	45400	269	0,852	0,583	0,558
Jaune citron	73800	476	0,930	0,264	0,768
Jaune orangé	59700	381	0,920	0,303	0,739
Rouge cerise	36600	242	0,953	0,175	0,839

TABLEAU XXV

ATMOSPHÈRE D

$x_1 = 25,00$ m

$x_2 = 450,00$ m

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E ₁	E ₂	$\tau_{x_2 - x_1}$	k_k	τ_k
Blanc (argent)	105000	233,0	0,718	0,780	0,458
Or	88650	202,5	0,741	0,705	0,494
Cuivre	70300	164,9	0,761	0,644	0,525
Bleu clair	37200	81,6	0,712	0,799	0,450
Jaune citron	56900	139,0	0,792	0,548	0,578
Jaune orangé	55500	124,5	0,727	0,751	0,472
Rouge cerise	4530	11,6	0,830	0,437	0,646

Toutefois dans les tableaux XXVIII et XXIX nous avons indiqué en outre les valeurs du coefficient de transparence k_d et du facteur de transmission τ_d décamétriques.

Les tableaux XXX et XXXI donnent respectivement pour ces deux types d'atmosphères les valeurs des rapports $\frac{k_c}{k_b}$ des

TABLEAU XXVI

ATMOSPHERE E

$x_1 = 33,33 \text{ m}$

$x_2 = 300,00 \text{ m}$

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E ₁	E ₂	$\tau_{x_2 - x_1}$	k_k	τ_k
Blanc (argent)	44550	441	0,802	0,827	0,437
Or	39800	401	0,816	0,762	0,466
Cuivre	30000	315	0,851	0,608	0,545
Bleu clair	18300	179	0,793	0,869	0,420
Jaune citron	28700	312	0,880	0,479	0,619
Jaune orangé	23750	237	0,808	0,799	0,449
Rouge cerise	13600	150,5	0,895	0,414	0,660

TABLEAU XXVII

ATMOSPHERE F

$x_1 = 10,00 \text{ m}$

$x_2 = 300,00 \text{ m}$

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E ₁	E ₂	$\tau_{x_2 - x_1}$	k_k	τ_k
Blanc (argent)	737000	584	0,712	1,172	0,310
Or	590500	470	0,717	1,145	0,318
Cuivre	476000	384	0,726	1,102	0,332
Bleu clair	337500	262	0,700	1,231	0,292
Jaune citron	480000	390	0,732	1,075	0,341
Jaune orangé	375000	301	0,722	1,124	0,324
Rouge cerise	43200	362	0,753	0,962	0,378

coefficients de transparence k_c en lumière colorée au coefficient de transparence k_b en lumière blanche et des rapports $\frac{\tau_c}{\tau_b}$ des facteurs de transmission τ_c en lumière colorée au facteur de transmission τ_b en lumière blanche.

TABLEAU XXVIII

ATMOSPHERE G

$x_1 = 40,00\text{ m}$

$x_2 = 80,00\text{ m}$

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E1	E2	$\tau_{x_2-x_1}$	k_d	τ_d	k_k	τ_k
Blanc (argent)	32250	5370	0,666	0,1015	0,903	10,15	$3,87 \times 10^{-5}$
Bleu clair	13150	2155	0,655	0,1057	0,899	10,57	$2,63 \times 10^{-5}$
Jaune citron	21200	3595	6780,	0,0970	0,908	9,70	$6,02 \times 10^{-5}$
Jaune orangé	18000	3050	0,677	0,0976	0,907	9,76	$5,75 \times 10^{-5}$
Rouge cerise	5550	980	0,708	0,0864	0,938	8,64	$18,1 \times 10^{-5}$

TABLEAU XXIX

ATMOSPHERE H

$x_1 = 40,00\text{ m}$

$x_2 = 60,00\text{ m}$

Nature des réflecteurs ou des ampoules	E1	E2	$\tau_{x_2-x_1}$	k_d	τ_d	k_k	τ_k
Blanc (argent)	22350	6780	0,682	0,1912	0,826	19,12	$5,90 \times 10^{-9}$
Bleu clair	9100	2745	0,679	0,1933	0,824	19,33	$3,98 \times 10^{-9}$
Jaune citron	15900	4855	0,687	0,1875	0,824	18,75	$7,11 \times 10^{-9}$
Jaune orangé	14860	4480	0,678	0,1945	0,823	19,45	$3,55 \times 10^{-9}$
Rouge cerise	2870	904	0,708	0,1723	0,842	17,23	$33,2 \times 10^{-9}$

Nous donnons ci-après un exemple des calculs effectués pour l'établissement des différents tableaux.

Lumière blanche - Atmosphère A

Mesures effectuées à $x_1 = 33,33$ mètres			Mesures effectuées à $x_2 = 300,00$ mètres		
Lecture sur le photo- mètre (1)	Facteur de transmission de l'écran neutre	Eclairement en unités arbitraires	Lecture sur le photo- mètre (1)	Facteur de transmission de l'écran neutre	Eclairement en unités arbitraires
50,2	0,000941	53400	62,7	0,1030	608

De ce tableau on déduit :

$$\tau_{x_2 - x_1} = \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^2 \frac{E_2}{E_1} = 81 \times \frac{608}{53\,400} = 0,922$$

$$k_k = - \frac{1}{M} \frac{1000 \log \tau}{x_2 - x_1} = - 2,302 \frac{1000 \times (-0,03527)}{266,66} = 0,304$$

$$\log \tau_k = - M k_k = - 0,434 \times 0,304 = - 0,13225 = \overline{1,86775}$$

$$\text{d'où } \tau_k = 0,737$$

1° Atmosphères brumeuses.

Ces atmosphères ont des coefficients de transparence kilométriques en lumière blanche variant de 0,304 à 1,172.

Pour comparer les lumières colorées dans les différentes atmosphères, nous avons tracé, pour chacune de ces lumières, les courbes des rapports $\frac{k_c}{k_b}$ en fonction de k_b qui caractérise optiquement chaque atmosphère (fig.40).

La lumière blanche est représentée par la droite horizontale d'ordonnée 1 ; la courbe représentant la lumière bleue est située au-dessus de cette horizontale et s'en rapproche quand le coefficient de transparence croît, ce qui montre que la lumière bleue est moins bien transmise que la lumière blanche dans ces atmosphères ; les courbes représentatives des autres lumières sont toutes situées au-dessous de l'horizontale figurant la lumière

(1) Moyenne de deux séries de dix mesures alternées.

TABLEAU XXX

Nature des réflecteurs ou des ampoules	Atmosphère A		Atmosphère B		Atmosphère C		Atmosphère D		Atmosphère E		Atmosphère F	
	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$
Blanc (argent)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Or	0,773	1,072	0,748	1,135	0,682	1,185	0,904	1,078	0,922	1,065	0,980	1,025
Cuivre	0,553	1,145	0,683	1,172	0,733	1,152	0,826	1,145	0,735	1,245	0,942	1,072
Bleu clair	1,055	0,984	1,188	0,910	1,093	0,952	1,094	0,981	1,050	0,961	1,051	0,942
Jaune citron	0,424	1,190	0,764	1,125	0,494	1,310	0,703	1,262	0,579	1,416	0,917	1,100
Jaune orangé	0,523	1,158	0,930	1,035	0,567	1,262	0,963	1,030	0,967	1,028	0,959	1,050
Rouge cerise	0,237	1,262	0,251	1,454	0,328	1,432	0,561	1,410	0,501	1,510	0,821	1,220

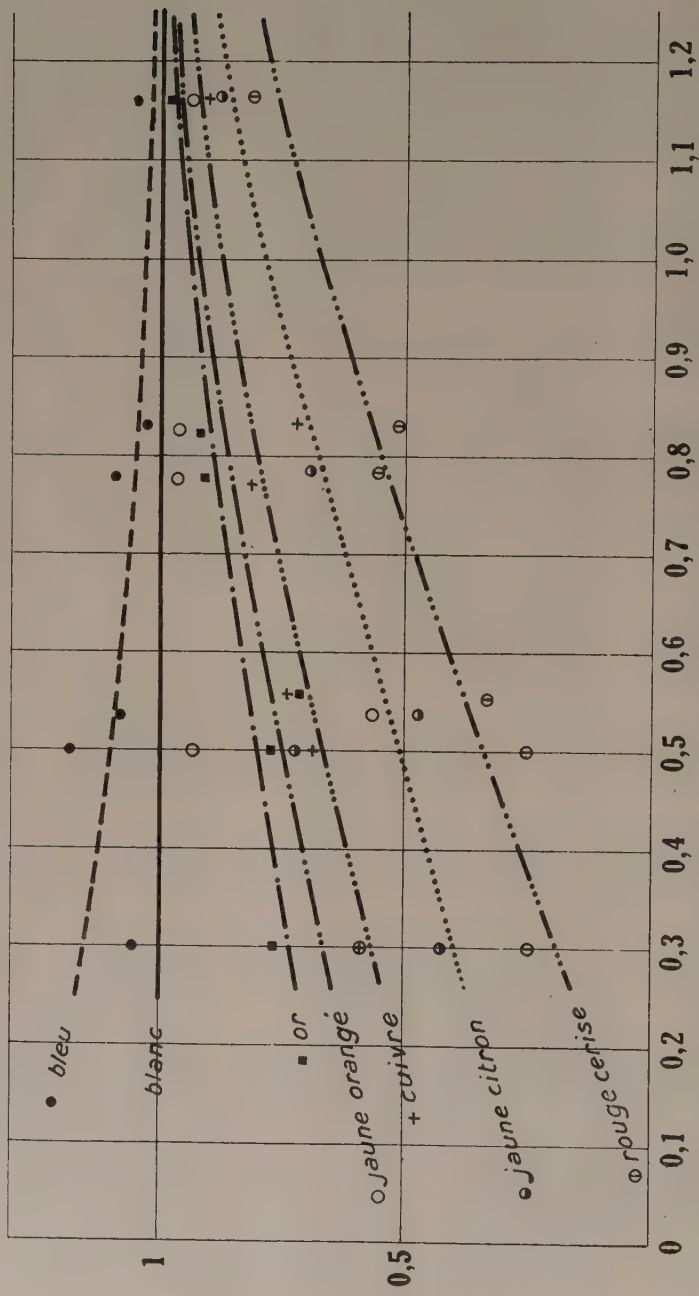


Fig. 40 — Courbes représentatives du rapport $\frac{k_r}{k_b}$ en fonction de k_b pour les diverses lumières colorées.

blanche et dans l'ordre rouge, jaune, cuivre, orangé, or, celle relative au rouge étant la plus éloignée, ce qui indique l'ordre dans lequel ces lumières sont le mieux transmises; elles se rapprochent de l'horizontale quand le coefficient de transparence croît, ce qui semble montrer qu'à partir d'une certaine valeur assez élevée de ce coefficient toutes ces lumières se transmettent également.

2° Brouillards.

Les coefficients de transparence en lumière blanche des deux brouillards retenus sont de 10,15 et de 19,12.

Comme pour les atmosphères brumeuses, les rapports $\frac{k_c}{k_b}$ consignés dans le tableau XXXI se classent dans le même ordre, mais diffèrent peu les uns des autres.

TABLEAU XXXI

Nature des réflecteurs ou des ampoules	Atmosphère G		Atmosphère H	
	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$ (décamé- trique)	$\frac{k_c}{k_b}$	$\frac{\tau_c}{\tau_b}$ (décamé- trique)
Blanc (argent)	1,000	1,000	1,000	1,000
Bleu clair	1,042	0,996	1,010	0,997
Jaune citron	0,954	1,005	0,980	1,002
Jaune orangé	0,960	1,004	1,016	0,996
Rouge cerise	0,850	1,038	0,900	1,018

Si nous comparons l'ensemble des résultats pour essayer de dégager une loi, il semble tout d'abord qu'il n'existe aucune discontinuité dans la transmission de la lumière par les atmosphères brumeuses et les brouillards.

La lumière bleue, comparée à la lumière blanche, est moins bien transmise; les lumières rouge, jaune et orangée sont mieux transmises, mais l'écart diminue quand le coefficient de transparence augmente.

Si nous comparons nos résultats à ceux de STILES, on s'aperçoit : a) qu'ils confirment ceux qu'il a obtenus dans des atmosphères dont le coefficient de transparence kilométrique était compris entre 4,5 et 40 ; b) que dans les brouillards de coefficient de transparence kilométrique compris entre 40 et 300 qu'il a expérimentés, mais qu'il ne nous a pas été donné de rencontrer dans la région parisienne, les lumières rouge, jaune et orangée se transmettent comme la lumière blanche dans les brouillards d'un coefficient de transparence de l'ordre de 50, mais moins bien que la lumière blanche dans ceux caractérisés par des coefficients de transparence kilométriques supérieurs.

Nous avons schématisé ces résultats dans la figure 41.

Remarquons encore que la lumière orangée se transmet moins bien que les lumières jaune et rouge, phénomène d'ailleurs enregistré par STILES et déjà signalé par KARRER et TYNDALL.

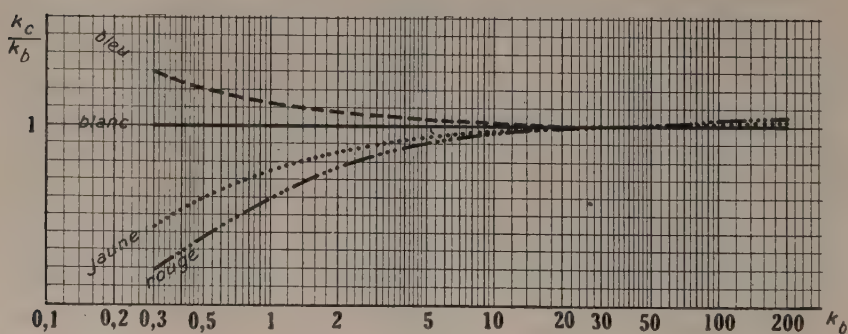


Fig. 41. — Schéma représentant le sens des variations du rapport $\frac{k_c}{k_b}$ en fonction de k_b .

Nous donnons dans le tableau XXXII les valeurs en Angströms de la longueur d'onde dominante des lumières rouge, orangée et jaune (pour lesquelles le facteur de pureté est voisin de l'unité), mesurées à des distances de 1 et de 150 mètres du projecteur dans les deux brouillards.

TABLEAU XXXII

Atmosphères	Longueur d'onde dominante à 1 mètre			Longueur d'onde dominante à 150 mètres		
	Jaune	Orangé	Rouge	Jaune	Orangé	Rouge
G	5860	5960	6160	5990	6030	6230
H	5860	5960	6150	5925	6000	6185

On voit d'après ces résultats que la longueur d'onde dominante de chacune de ces trois lumières tend nettement vers le rouge, mais d'autant moins rapidement que le coefficient de transparence de l'atmosphère est plus élevé ; ceci montre que les radiations rouges sont les moins diffusées dans de telles atmosphères.

Le tableau XXXIII donne, à titre d'exemple, pour une atmosphère de brouillard la valeur du coefficient de transparence kilométrique déterminé d'après les densités β_1 et β_2 d'un coin neutre situé à deux distances x_1 et x_2 d'une lampe à ampoule incolore placée à l'intérieur d'un boîtier fermé par verre coloré.

TABLEAU XXXIII

ATMOSPHÈRE H

 $x_1 = 40,00$ m $x_2 = 80,00$ m

Nature de la lumière	β_1	β_2	k_k mesuré avec le coin neutre	k_k mesuré avec le photomètre	Ecart en pour cent
Blanche	1,701	0,894	20,18	19,12	— 5,5
Bleu clair	1,302	0,407	22,38	19,33	—15,8
Jaune citron	1,590	0,726	21,60	18,75	—15,2
Jaune orangé	1,505	0,633	21,80	19,45	—12,1
Rouge cerise	1,130	0,390	18,51	17,23	— 7,4

Cette méthode présente l'inconvénient de ne pouvoir servir que dans les brouillards épais et d'être peu précise par suite des variations instantanées du seuil de visibilité de l'opérateur.

Le tableau XXXIV donne, à titre d'exemple, pour une atmosphère brumeuse, les résultats des mesures d'éclairement total effectuées sur le plan d'épreuve diffusant du photomètre disposé à des distances du projecteur de 25, 50, 150 et 450 mètres ; le tableau XXXV donne, déduit du tableau précédent, les éclairagements relatifs produits par des projecteurs d'égale intensité lumineuse.

TABLEAU XXXIV

ATMOSPHÈRE D

Nature de la lumière	Eclairement total Lux			
	Distance 25 m	Distance 50 m	Distance 150 m	Distance 450 m
Blanche	57,1	13,1	1,31	0,139
Bleu clair	22,8	5,89	0,655	0,0675
Jaune citron	50,8	12,1	1,22	0,130
Jaune orangé	45,4	9,38	0,795	0,0655
Rouge cerise	20,4	4,75	0,480	0,0462

Nous avons tracé les courbes correspondantes dans un système de coordonnées logarithmiques en portant en abscisses les distances et en ordonnées les éclairagements (fig. 42 et 43).

Ces courbes sont sensiblement des droites et on constate que la courbe de la lumière bleue est celle qui se rapproche le plus de la droite théorique puis, dans l'ordre, celles des lumières jaune, blanche, rouge et orangée.

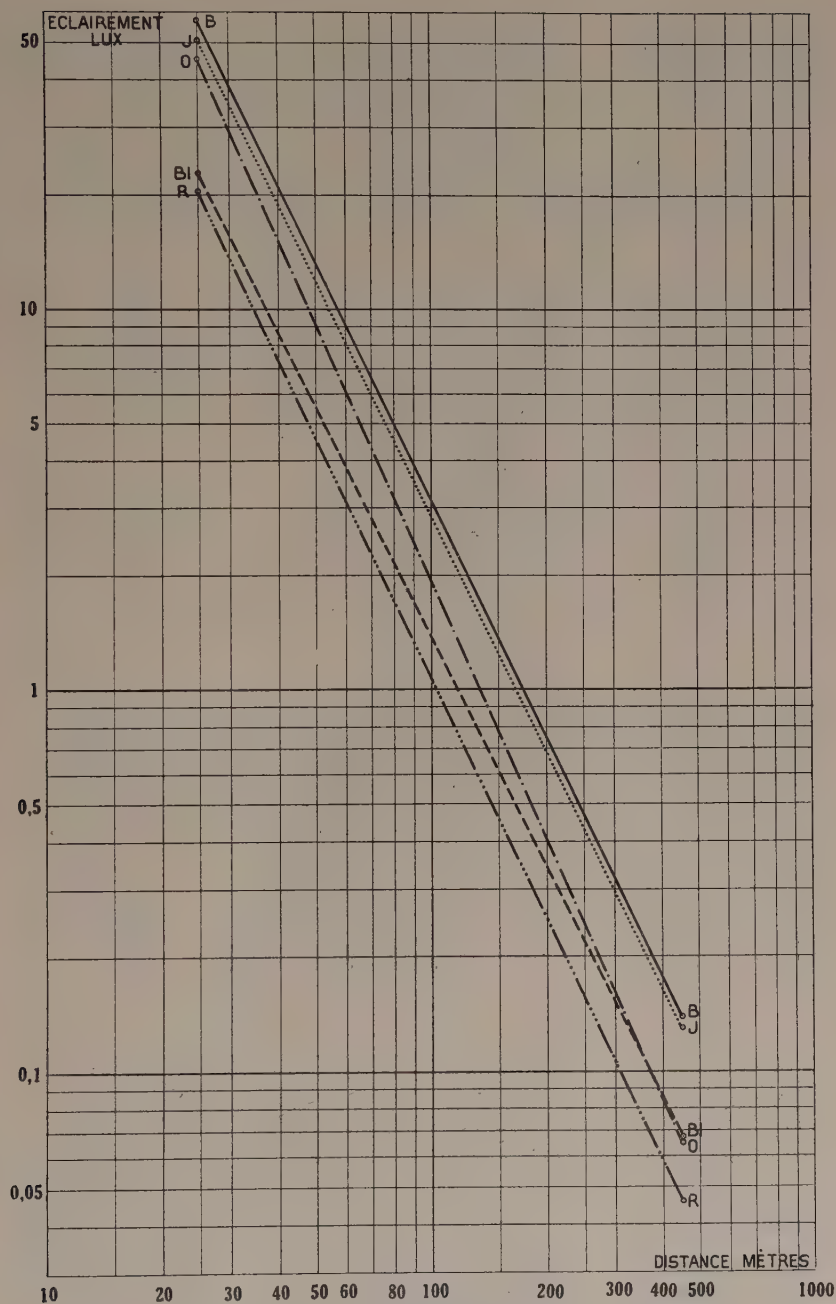


Fig. 42. — Courbes représentatives de l'éclairement total en fonction de la distance au projecteur.

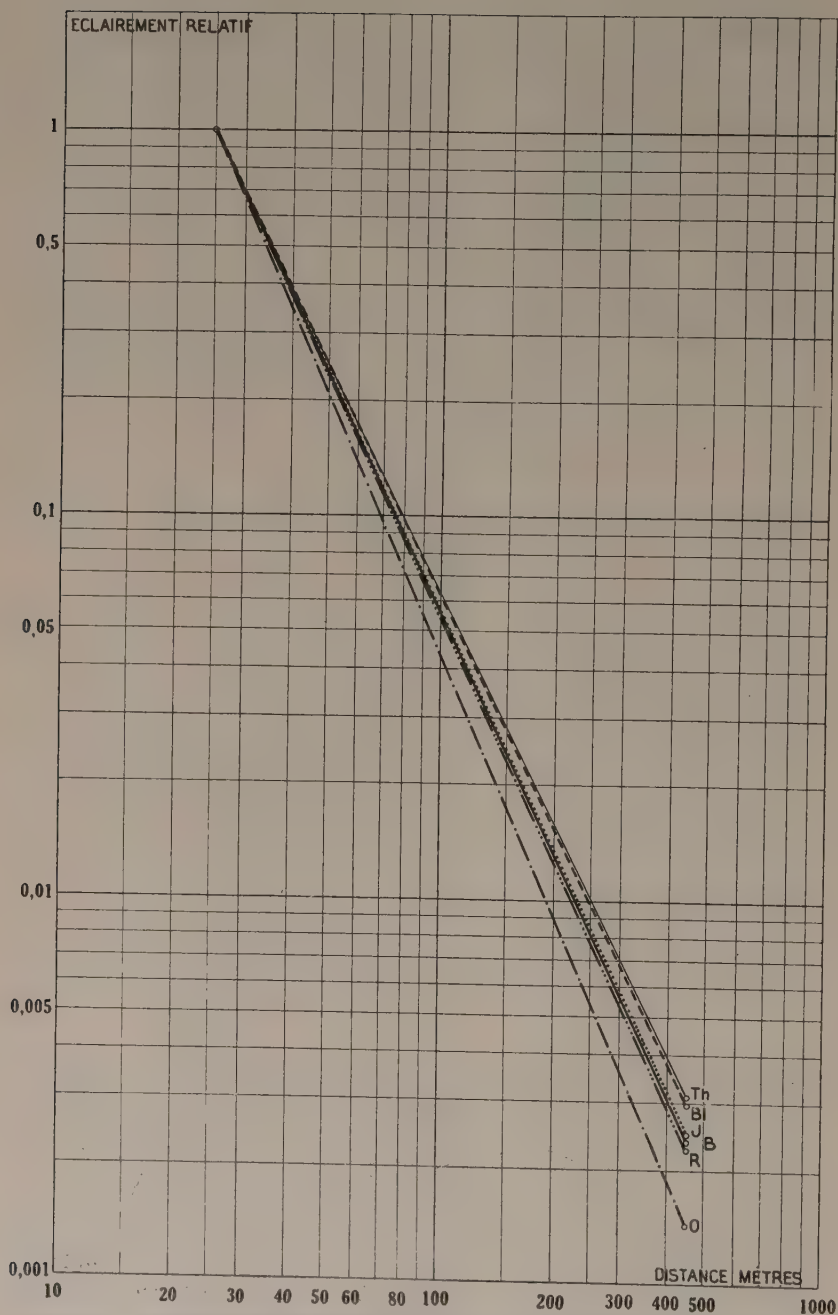


Fig. 43. — Courbes représentatives de l'éclairement relatif produit par des projecteurs d'égale intensité lumineuse en fonction de la distance.

TABLEAU XXXV

ATMOSPHÈRE D

Nature de la lumière	Eclairement relatif			
	Distance 25 m	Distance 50 m	Distance 150 m	Distance 450 m
Blanche	1,00	0,231	0,0230	0,00237
Bleu clair	1,00	0,258	0,0287	0,00296
Jaune citron	1,00	0,239	0,0240	0,00247
Jaune orangé	1,00	0,206	0,0175	0,00143
Rouge cerise	1,00	0,232	0,0234	0,00225
Inverse du carré de la distance	1,00	0,250	0,0278	0,00309

Des résultats analogues ont été enregistrés dans toutes les atmosphères expérimentées ; ils sont contraires à ceux obtenus par la méthode de mesure des éclairagements sans plan d'épreuve diffusant et s'expliquent par le fait que le plan d'épreuve diffusant, outre la lumière transmise régulièrement, reçoit celle diffusée par l'atmosphère, par le sol et par les objets bordant la route.

b) Mesure de la lumière diffusée en arrière.

Le tableau XXXVI contient les résultats des mesures de brillance de l'atmosphère effectuées dans une direction parallèle à l'axe du faisceau en plaçant l'objectif du téléphotomètre à 0,50 mètre en arrière du projecteur et à 0,05 mètre au-dessus de celui-ci (fig. 44). Les mesures sont délicates du fait qu'il faut éviter de viser le sol à grande distance.

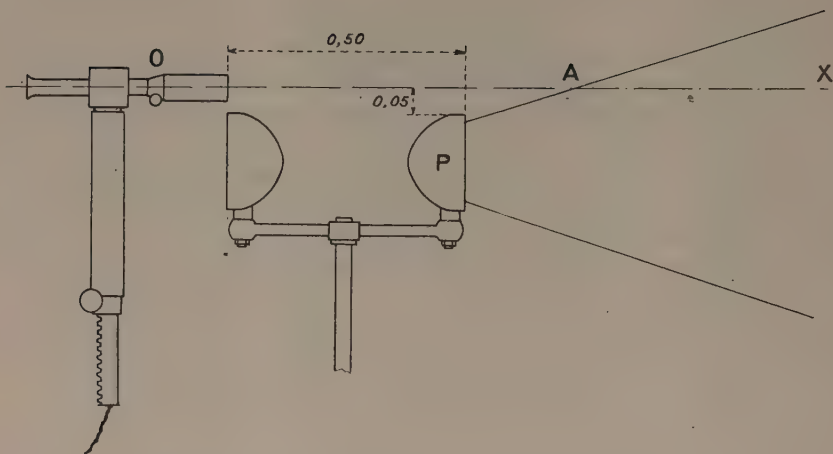


Fig. 44. — Schéma montrant la disposition du téléphotomètre pour la mesure de la brillance du fond d'atmosphère.

TABLEAU XXXVI

Nature de la lumière	Brillance de l'atmosphère Bougies par mètre carré							
	Atmosphère A	Atmosphère B	Atmosphère C	Atmosphère D	Atmosphère E	Atmosphère F	Atmosphère G	Atmosphère H
Blanc (argent)	0,0216	0,0185	0,0226	0,0214	0,0429	0,0673	0,323	0,765
Or	0,0155	0,0138	0,0152	0,0135	0,0283	0,0497	0,237	0,539
Cuivre	0,0132	0,0111	0,0122	0,0125	0,0246	0,0414	0,196	0,492
Bleu clair	0,0135	0,0112	0,0124	0,0125	0,0253	0,0383	0,158	0,355
Jaune citron	0,0146	0,0137	0,0154	0,0166	0,0286	0,0385	0,267	0,696
Jaune orangé	0,0075	0,0078	0,0084	0,0099	0,0186	0,0282	0,195	0,55
Rouge cerise	0,00393	0,00312	0,00364	0,00476	0,00818	0,04140	0,0936	0,259

Les résultats obtenus ne sont valables que pour la répartition lumineuse des projecteurs utilisés et les conditions expérimentales définies ci-dessus.

Le tableau XXXVII donne l'intensité lumineuse relative des différents projecteurs déduite de la mesure de l'éclairement produit à une distance de 25 mètres dans une atmosphère parfaitement transparente et rapportée à celle du projecteur de lumière blanche que nous avons prise égale à l'unité.

TABLEAU XXXVII

Nature de la lumière	Intensité lumineuse relative							
	Atmosphère A	Atmosphère B	Atmosphère C	Atmosphère D	Atmosphère E	Atmosphère F	Atmosphère G	Atmosphère H
Blanc (argent)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Or	0,719	0,723	0,685	0,704	0,716	0,732	0,698	0,700
Cuivre	0,626	0,599	0,604	0,608	0,658	0,670	0,621	0,645
Bleu clair	0,417	0,422	0,407	0,401	0,425	0,412	0,424	0,430
Jaune citron	0,893	0,901	0,874	0,890	0,865	0,842	0,846	0,868
Jaune orangé	0,805	0,810	0,774	0,796	0,785	0,792	0,787	0,800
Rouge cerise	0,325	0,336	0,316	0,358	0,318	0,302	0,357	0,345

Le tableau XXXVIII donne les rapports $\frac{B_c}{B_b}$ des brillances B_c et B_b de l'atmosphère en lumière colorée et en lumière blanche pour des projecteurs d'égale intensité lumineuse.

La figure 45 représente les courbes de $\frac{B_c}{B_b}$ en fonction du coefficient de transparence k_b en lumière blanche caractérisant chaque atmosphère.

Elles montrent que la brillance des atmosphères brumeuses est, relativement à la lumière blanche, plus grande en lumière bleue, plus petite en lumières orangée, rouge et jaune.

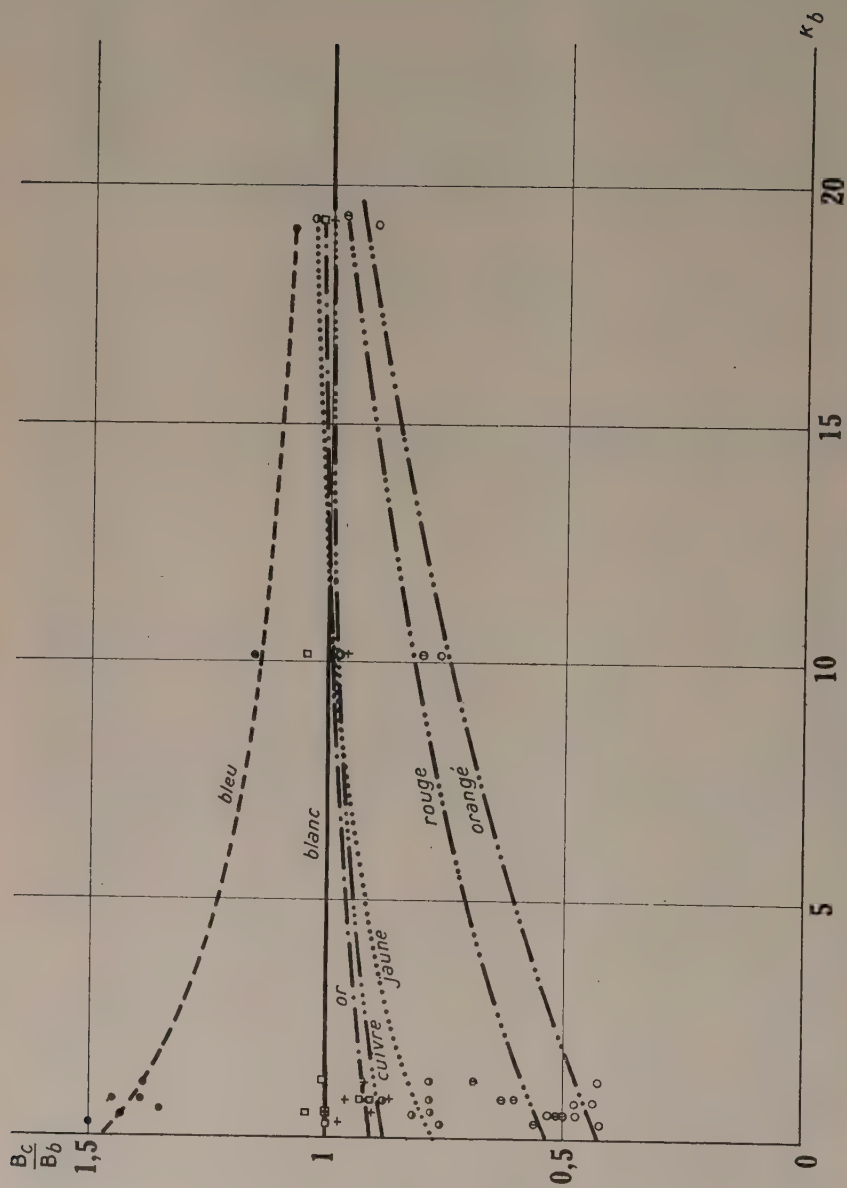


Fig. 45 — Courbes représentatives du rapport $\frac{B_c}{B_b}$ en fonction de κ_b pour les diverses lumières colorées.

TABLEAU XXXVIII

Nature de la lumière	Atmosphère A $k_k = 0,304$ $\frac{B_c}{B_b}$	Atmosphère B $k_k = 0,501$ $\frac{B_c}{B_b}$	Atmosphère C $k_k = 0,534$ $\frac{B_c}{B_b}$	Atmosphère D $k_k = 0,780$ $\frac{B_c}{B_b}$	Atmosphère E $k_k = 0,827$ $\frac{B_c}{B_b}$	Atmosphère F $k_k = 1,72$ $\frac{B_c}{B_b}$	Atmosphère G $k_k = 10,15$ $\frac{B_c}{B_b}$	Atmosphère H $k_k = 19,12$ $\frac{B_c}{B_b}$
Blanc (argent)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Or	1,00	1,04	0,98	0,90	0,92	1,01	1,05	1,01
Cuivre	0,98	1,00	0,90	0,96	0,87	0,92	0,98	1,00
Bleu clair	1,50	1,43	1,35	1,45	1,38	1,38	1,5	1,08
Jaune citron	0,76	0,82	0,78	0,87	0,77	0,68	0,98	1,05
Jaune orangé	0,43	0,52	0,48	0,58	0,54	0,53	0,77	0,90
Rouge cerise	0,56	0,50	0,51	0,63	0,60	0,69	0,81	0,98

Remarquons que la lumière orangée est moins diffusée que la lumière rouge et que les lumières réfléchies par l'or et le cuivre se comportent approximativement comme celle réfléchie par l'argent.

Dans les brouillards légers que nous avons expérimentés, les lumières se comportent de la même manière que dans les atmosphères brumeuses, mais de façon moins marquée.

Les courbes montrent encore que dans les brouillards épais la lumière bleue tend à être moins diffusée que les autres lumières, résultat comparable à celui trouvé par BORN et FRANZ dans les brouillards artificiels (coefficient de transparence kilométrique de l'ordre de 450) qui ont indiqué que dans ces brouillards la lumière rouge était notablement plus diffusée que les autres lumières.

c) Détermination de la distance limite de visibilité d'un test.

Le tableau XXXIX donne, pour les différentes atmosphères les distances de visibilité du test éclairé par chacune des lumières étudiées ; ces distances sont les moyennes de celles déterminées en éloignant et en rapprochant le test.

TABLEAU XXXIX

Nature de la lumière	Distances de visibilité Mètres							
	Atmosphère A	Atmosphère B	Atmosphère C	Atmosphère D	Atmosphère E	Atmosphère F	Atmosphère G	Atmosphère H
Blanc (argent)	290	290	260	267	265	280	130	93
Or	247	268	237	240	236	257	100	81
Cuivre	256	268	243	235	245	284	120	83
Bleu clair	206	216	206	192	210	217	100	77
Jaune citron	320	310	286	277	274	289	140	93
Jaune orangé	284	275	260	250	269	247	131	87
Rouge cerise	235	244	243	217	232	257	110	81

Le tableau XXXX déduit du précédent contient les distances relatives de visibilité en prenant égale à l'unité la distance de visibilité en lumière blanche.

Le tableau XXXXI indique pour les différentes atmosphères les distances relatives de visibilité du test en lumière blanche en fonction de l'intensité lumineuse du projecteur ; celles-ci ont été déduites des distances de visibilité du test obtenues en interposant devant l'œil de l'opérateur un coin neutre réglé pour un facteur de transmission donné.

TABLEAU XXXX

Nature de la lumière	Distances relatives de visibilité							
	Atmosphère A	Atmosphère B	Atmosphère C	Atmosphère D	Atmosphère E	Atmosphère F	Atmosphère G	Atmosphère H
Blanc (argent)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Or	0,85	0,91	0,91	0,90	0,89	0,925	0,865	0,88
Cuivre	0,88	0,91	0,935	0,88	0,925	1,005	0,89	0,895
Bleu clair	0,70	0,74	0,77	0,72	0,79	0,78	0,75	0,83
Jaune citron	1,10	1,075	1,105	1,03	1,04	1,025	1,035	1,00
Jaune orangé	0,98	0,95	1,015	0,94	1,015	0,915	0,98	0,94
Rouge cerise	0,81	0,835	0,925	0,815	0,88	0,92	0,815	0,865

TABLEAU XXXXI

Facteur de trans- mission du coin neutre	Distances relatives de visibilité en lumière blanche							
	Atmosphère A	Atmosphère B	Atmosphère C	Atmosphère D	Atmosphère E	Atmosphère F	Atmosphère G	Atmosphère H
1,000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,631	0,81	0,84	0,88	0,86	0,88	0,89	0,92	0,92
0,426	0,70	0,75	0,78	0,75	0,77	0,82	0,84	0,85
0,263	0,58	0,63	0,68	0,66	0,65	0,75	0,81	0,80
0,209	0,52	0,55	0,65	0,64	0,63	0,74	0,79	0,78

Nous avons représenté sur les figures 46 à 49 les résultats obtenus dans chacune des atmosphères par des diagrammes à abscisses logarithmiques et à ordonnées proportionnelles.

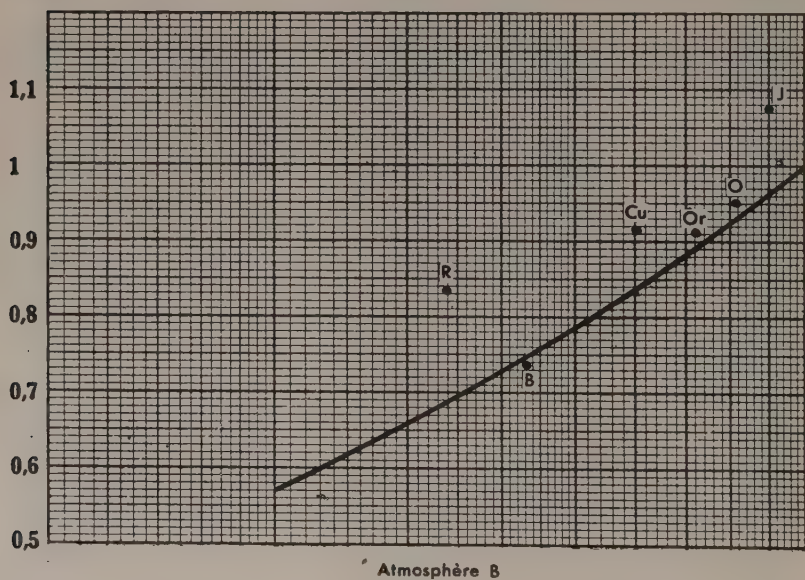
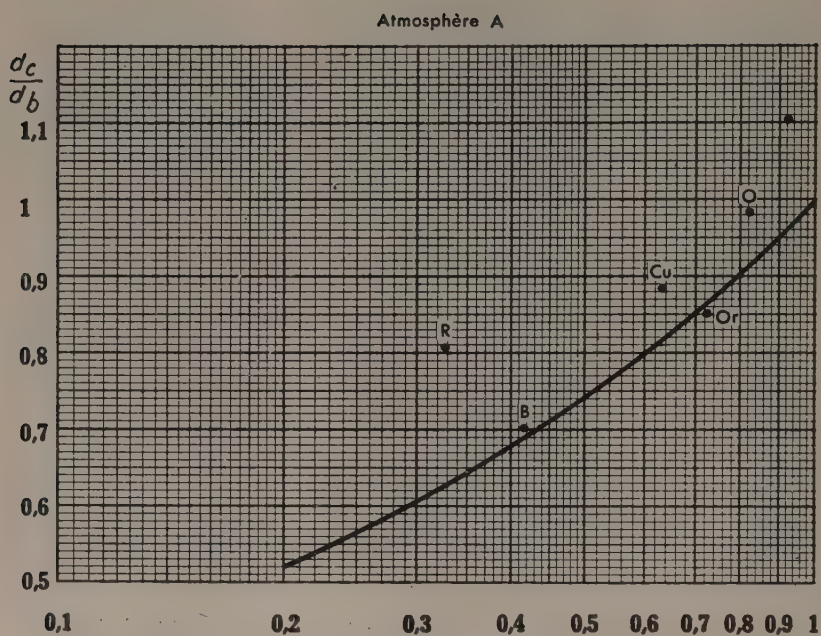
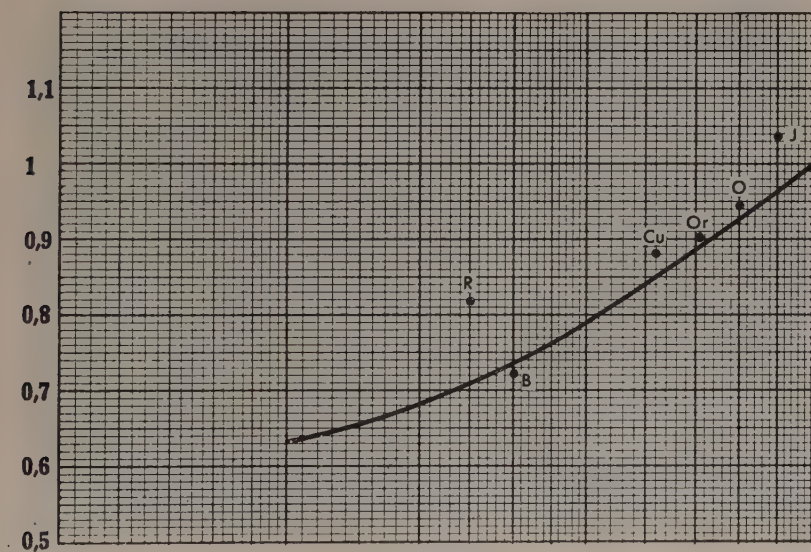
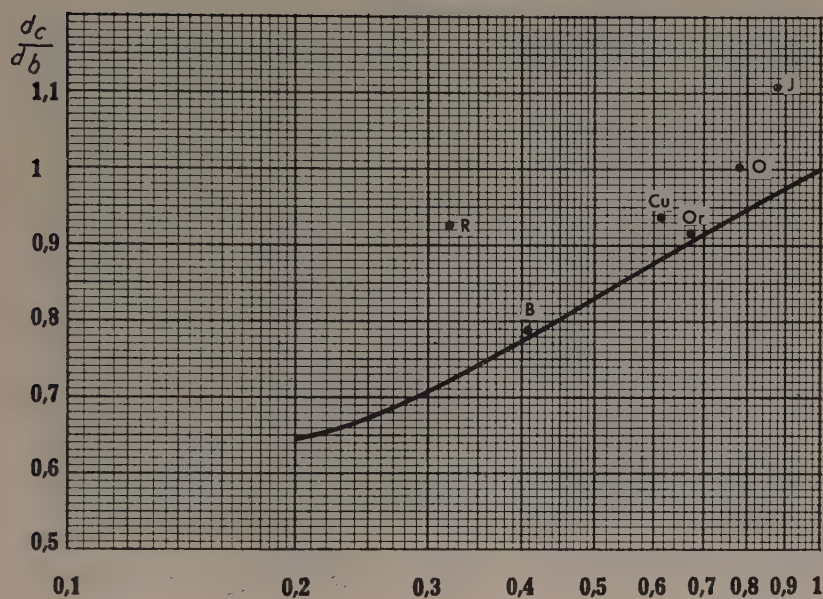


Fig. 46

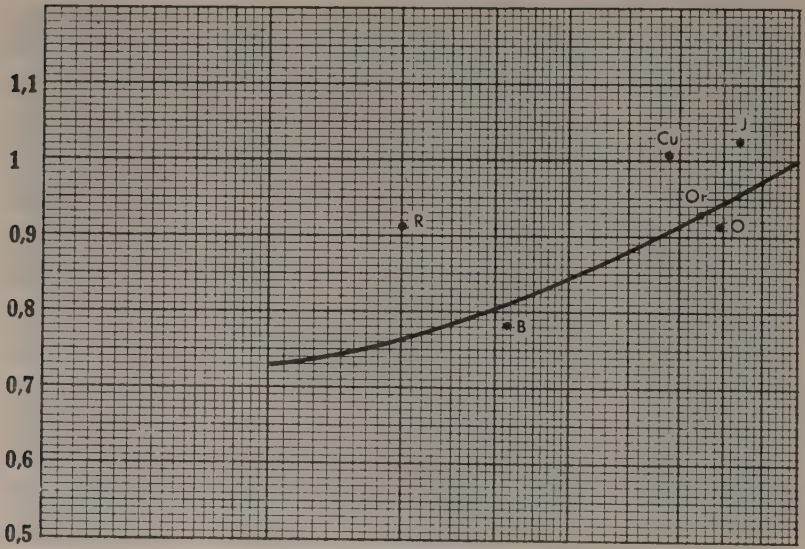
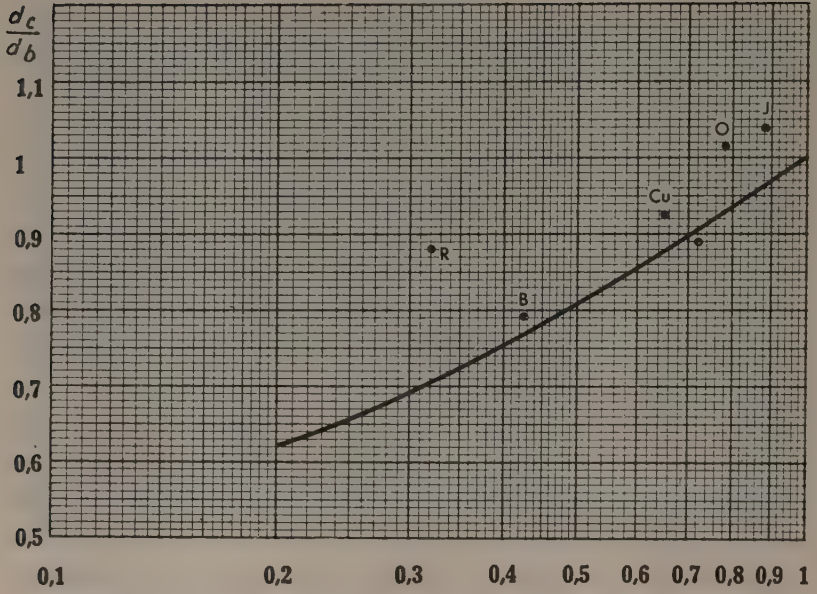
Atmosphère C



Atmosphère D

Fig. 47

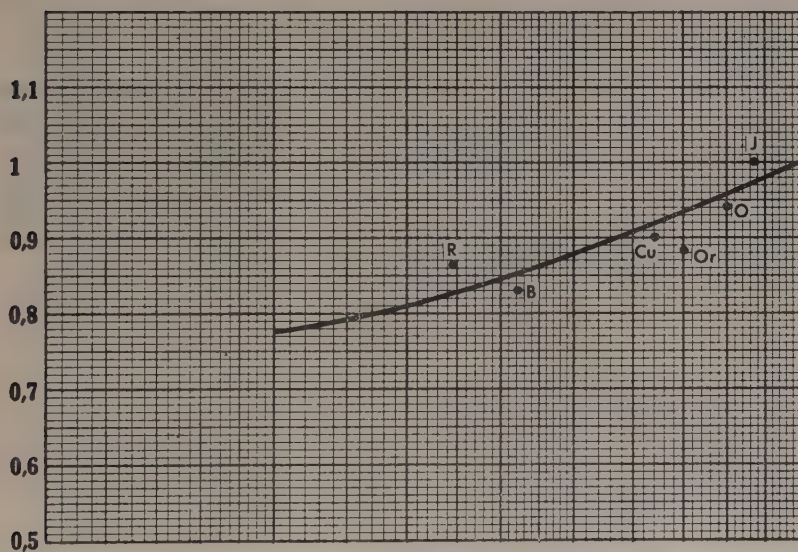
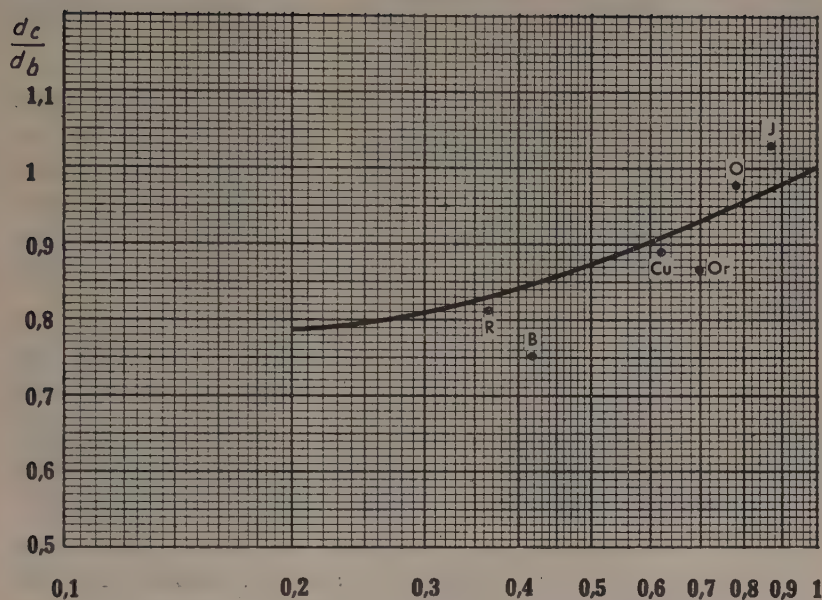
Atmosphère E



Atmosphère F

Fig. 48

Atmosphère G



Atmosphère H

Fig. 49

Nous avons porté en abscisses les intensités lumineuses relatives des projecteurs et en ordonnées les distances relatives de visibilité du test.

Les valeurs tirées du tableau XXXXI permettent de tracer la courbe des distances relatives de visibilité en fonction de l'intensité lumineuse relative en lumière blanche ; les valeurs tirées des tableaux XXXVII et XXXX déterminent, pour chaque lumière, un point dont la distance verticale à la courbe précédente détermine le gain de portée à égalité d'intensité lumineuse.

On remarquera que, dans les atmosphères brumeuses, les distances de visibilité pour des projecteurs d'égale intensité lumineuse sont plus faibles pour la lumière bleue et pour la lumière réfléchie par l'or, plus élevées pour celles réfléchies par le cuivre ou transmises par les ampoules orangée, jaune ou rouge.

Au point de vue de l'utilisation pratique le tableau XXXX fait ressortir l'intérêt que présente la lumière jaune par rapport aux autres lumières.

Les gains notables que procure l'emploi de cette lumière, tels que nous venons de le constater, ne peuvent être expliqués par une plus grande transparence de l'atmosphère en lumière jaune, mais par la diminution importante du seuil de perceptibilité différentielle ; ce dernier facteur est en fait le seul qui agisse dans les brouillards un peu épais.

CHAPITRE V

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

J'ai étudié la transmission de certaines lumières colorées et la visibilité d'objets éclairés par ces lumières au travers de l'atmosphère polluée de la région parisienne.

L'atmosphère de cette région, caractérisée par un faible facteur de transmission kilométrique moyen (de l'ordre de 0,6), rentre dans la catégorie des atmosphères dites "brumeuses"; les brouillards y sont peu opaques et ne sauraient être comparés à ceux de la région de Londres.

Nous avons opéré en hiver, au niveau du sol et sur des distances de quelques centaines de mètres, en notant les conditions météorologiques.

Nous avons utilisé pour cette étude des projecteurs d'automobiles émettant des lumières colorées dont nous avons déterminé les caractéristiques.

L'étude a porté sur la mesure du coefficient de transparence, sur la mesure de la diffusion en arrière et sur la distance limite de visibilité d'un objet.

a) Le coefficient de transparence a été déduit de mesures d'éclairement effectuées au moyen d'un photomètre sans écran diffusant afin d'éliminer l'influence de la lumière diffusée.

Dans les atmosphères brumeuses, nous avons établi que, par rapport à la lumière blanche, les lumières les mieux transmises sont, dans l'ordre croissant, les lumières orangée, jaune et rouge, la lumière bleue étant moins bien transmise; dans les brouillards, semblable constatation a été faite.

La loi de transmission des lumières colorées complexes semble être une fonction continue du coefficient de transparence en lumière blanche ; nous l'avons déterminée entre les valeurs 0,3 et 20 de ce coefficient.

En comparant nos résultats à ceux obtenus par STILES et par BORN et FRANZ, il nous a paru possible d'étendre cette loi aux brouillards épais.

On peut l'exprimer de la façon suivante :

Le rapport $\frac{k_c}{k_b}$ du coefficient de transparence k_c en lumière colorée au coefficient de transparence k_b en lumière blanche est, pour la lumière bleue, supérieur à l'unité dans les atmosphères caractérisées par des coefficients de transparence kilométrique compris entre 0 et 50 ; ce rapport tend vers l'unité dans les brouillards caractérisés par des coefficients de transparence supérieurs à cette dernière valeur. Pour les lumières orangée, jaune et rouge, il est inférieur à l'unité dans les atmosphères caractérisées par des coefficients de transparence compris entre ceux indiqués précédemment ; il tend vers l'unité dans les brouillards caractérisés par des coefficients supérieurs à 50 et devient supérieur à l'unité dans les brouillards caractérisés par des coefficients de transparence kilométrique supérieurs à 100.

La meilleure transmission de la lumière rouge est donc vérifiée dans les atmosphères brumeuses et ce d'autant mieux que ces atmosphères sont plus transparentes. Ces résultats confirment les théories de RAYLEIGH sur la transmission de la lumière dans les atmosphères de grande limpidité et celles de MIE et de BLUMER qui indiquent que la lumière rouge est moins bien transmise dans les brouillards de grande opacité.

Toutefois, si l'on détermine l'exposant de la loi de RAYLEIGH généralisée en affectant à chaque lumière complexe la longueur d'onde de sa radiation dominante, on obtient des exposants très supérieurs à 4, ce qui montre que l'on ne peut assimiler une lumière complexe à une radiation monochromatique ayant pour longueur d'onde celle de sa radiation dominante.

Il convient de remarquer que la lumière orangée se trouve classée entre la lumière blanche et la lumière jaune, alors que l'on aurait pu supposer qu'elle précéderait immédiatement la lumière rouge.

Les mesures d'éclairement que nous avons faites avec un photomètre à écran diffusant ont permis de constater que l'emploi d'un tel appareil doit être écarté en raison des résultats erronés dus à la lumière diffusée.

b) La diffusion en arrière a été déterminée par la mesure de la brillance de l'atmosphère au moyen d'un téléphotomètre mis au point sur l'infini.

A égalité d'intensité lumineuse des faisceaux émis, nous avons montré que, par rapport à la lumière blanche, la lumière bleue est la plus diffusée et que, dans l'ordre croissant, les lumières jaune, rouge et orangée sont les moins diffusées.

C'est dans les atmosphères les plus transparentes que les écarts sont les plus marqués ; ceux-ci étant très faibles dans les brouillards légers, on est amené à penser que les lumières rouges sont plus diffusées en arrière dans les brouillards épais.

c) La distance limite de visibilité d'un test dépend des propriétés physiques de l'atmosphère et des propriétés physiologiques de l'œil.

A égalité d'intensité lumineuse des faisceaux émis, nous avons établi que, par rapport à la lumière blanche, les distances de visibilité sont plus petites en lumière bleue, plus grandes, en lumières orangée, jaune et rouge.

Dans les brouillards, contrairement à ce que l'on pourrait attendre de l'étude de la transparence, les distances limite de visibilité sont toujours plus grandes en lumière jaune qu'en toute autre lumière. Nous avons été conduits à attribuer ce phénomène à la diminution importante du seuil de perceptibilité différentielle en lumière jaune.

Il est probable qu'aucune amélioration ne peut être enregistrée dans les brouillards très épais (d'un coefficient de transparence compris entre 100 et 500), ce qui expliquerait les résultats de certains auteurs.

Il est à noter qu'aucune loi de diffusion de la lumière n'a pu être établie en fonction du diamètre des particules ou du degré hygrométrique, ce dernier semblant ne pas intervenir dans la transparence des atmosphères brumeuses, comme l'a déjà signalé Gabriel GUILBERT.

Les différents résultats que nous venons d'exposer ont été rapportés à des faisceaux de lumière colorée d'égale intensité lumineuse ; si nous nous plaçons au point de vue pratique, la lumière jaune, obtenue à l'aide d'ampoules en verre au sulfure de cadmium est la plus intéressante de toutes les lumières colorées quant à la visibilité.

BIBLIOGRAPHIE

1. — ÉTUDES THÉORIQUES SUR LES MILIEUX TROUBLES. DIFFUSION D'ORIGINE MOLÉCULAIRE ET PARTICULAIRE.

Lord RAYLEIGH.

Phil. Mag., 4^e série, t. 41, p. 107, 274 et 447, 1871 ; 5^e série, t. 12, p. 81, 1881 ; 5^e série, t. 47, p. 375, 1899 ; 6^e série, t. 35, p. 373, 1918 ; Proc. Trans. Roy. Soc., t. 84, p. 25, 1911 ; t. 90, p. 219, 1914 ; t. 94, p. 297, 1917.

L. LORENTZ.

Wied. Ann. der Phys., t. 11, 1880.

J.-C. MAXWELL.

Phil. Trans. Roy. Soc., t. 203, 1904 ; t. 205, 1906.

G. MIE.

Ann. der Phys., t. 25, p. 377, 1908.

C. WIENER.

Abh. der Kaiser Leopold Carol Akad., 1907 et 1909.

P. DEBYE.

Thèse, Munich 1908 ; Phys. Zeits., t. 9, p. 775, 1908 ; Ann. der Phys., t. 30, p. 57, 1909 ; Math. Ann., t. 67, p. 535, 1909.

T.-S. BROMWICH.

Phil. Mag., 6^e série, t. 38, p. 43, 1919 ; Phil. Trans. Roy Soc., t. 220, p. 175, 1920.

R. GANS.

Ann. der Phys., t. 37, p. 881, 1912 ; t. 47, p. 270, 1915 ; t. 62, p. 331, 1920 ; t. 76, p. 26, 1925.

R. MECKE.

Ann. der Phys., t. 61, p. 471, 1920 ; t. 62, p. 623, 1920 ; t. 65, p. 257, 1921.

M. SCHIRMANN.

Ann. der Phys., t. 59, p. 493, 1919.

J. ROSENBERG.

Ann. der Phys., t. 68, p. 414, 1922.

W. SHOULEJKIN.

Phil. Mag., 6^e série, t. 48, p. 307, 1924.

G. JOBST.

Ann. der Phys., t. 76, p. 863, 1925 ; t. 78, p. 158, 1925.

H. BLUMER.

Zeits. für Phys., t. 32, p. 119, 1925 ; t. 38, p. 304, 1926 ; t. 38, p. 920, 1926 ; t. 39, p. 195, 1926.

J.-A. STRATTON et H.-G. HOUGHTON.

Phys. Rev., t. 38, p. 159, 1931.

II. — ÉTUDES EXPÉRIMENTALES SUR LES MILIEUX TROUBLES. DIFFUSION PAR LES ÉMULSIONS, LES PRÉCIPITÉS ET LES COLLOÏDES.

- F. KIRCHNER.
Ann. der Phys., t. 13, p. 239, 1904.
- G. MIE.
Ann. der Phys., t. 25, p. 377, 1908.
- A. BOUTARIC.
Thèse, Paris 1918; Ann. de Phys., 9^e série, t. 9, p. 113, 1918.
- C. CHENEVEAU et R. AUDUBERT.
Compt. rend. Acad. des Sci., t. 168, p. 553, et 684, 1919.
- C. SCHAEFER et J. MERZKIRCH.
Zeits. für Phys., t. 13, p. 166, 1923.
- G.-I. POKROWSKI.
Zeits. für Phys., t. 38, p. 848, 1926.
- J.-W. RYDES et D.-E. YATES.
Journ. of Soc. of Glass. Techn., t. 10, p. 274, 1926.
- HYSLOP.
Journ. of Soc. of glass Techn., t. 11, p. 362, 1927.
- LAX, PIRANI et SCHÖNBORN.
Licht und Lampe, p. 173 et 209, 1928; Rec. des Trav. Commission Intern. de l'Eclairage, p. 1001, Saranac Inn 1928.
- J.-W. RYDES ET B.-S. COOPER.
Proc. of the Intern. Illum. Congress, Grande-Bretagne 1931, Vol. I p. 387, Londres 1932.

III. — TRANSPARENCE DE L'ATMOSPÈRE LIMPIDE OU LÉGÈREMENT BRUMEUSE.

- Lord RAYLEIGH.
Phil. Mag., 4^e série, t. 41, 1871; 5^e série, t. 12, 1881; 5^e série, t. 47, 1899.
- J. REY.
De la portée des projecteurs.. Berger-Levrault, Paris 1915.
- A. BOUTARIC.
Thèse, Paris 1918; Ann. de Phys., 9^e série, t. 9, p. 113, 1918.
- G.-I. POKROWSKI.
Zeits. für Phys., t. 34, p. 49, 1925.
- G. GUILBERT.
Compt. rend. Acad. des Sci., t. 183, p. 427, 1926.
- LINK.
Bull. de l'Observ. de Lyon, t. 11, p. 229, 1929.
- LINK et HUGON.
Compt. rend. Acad. des Sci., t. 190, p. 810, 1930; Rev. d'Opt., t. 9, p. 156, 1930.

- Y. ROCARD.
Rev. d'Opt., t. 9, p. 97, 1930 ; Compt. rend. des réunions de l'Inst. d'Opt., 2^e année, 1931.
- W.-E. KNOWLES MIDDLETON.
Trans. Roy. Soc. of Canada, 3^e Section, 3^e série, vol. 25, p. 39, 1931 ; vol. 26, p. 25, 1932.
- H. BUISSON, C. JAUSSEMERAN et P. ROUARD.
Compt. rend. Acad. des Sci., t. 190, p. 808, 1930 ; Rev. d'Opt., t. 12, p. 70, 1933.
- J. DUCLAUX.
Bull. de l'Observ. de Lyon, t. 11, p. 5, 69 et 83, 1929 ; t. 12, p. 225, 1930 ; Compt. rend. des réunions de l'Inst. d'Opt., 2^e année, 1931 ; Journ. de Phys., t. 6, p. 323 et 401, 1935.
- E.-O. HULBURT.
Journ. of Opt. Soc. of America, t. 25, p. 125, 1935.

IV. — TRANSPARENCE DES BROUILLARDS ARTIFICIELS.

- A. RUDOLPH.
Phys. Zeits., t. 5, p. 57, 1904.
- C.-L. UTTERBACK.
Trans. Illum. Eng. Soc., t. 14, p. 133, 1919.
- G.-I. POKROWSKI.
Zeits. für Phys., t. 43, p. 394 et 769, 1927.
- H.-G. HOUGHTON.
Phys. Rev., t. 38, p. 152, 1931.
- S.-H. ANDERSON.
Phys. Rev., t. 38, p. 1012, 1931.
- W. KULB.
Thèse, Erlangen 1931 ; Ann. der Phys., t. 31, p. 679, 1931.
- H. SAUER.
Zeits. für Instrum., t. 51, p. 408, 1931.
- F. BORN et K. FRANZ.
Das Licht, t. 3, p. 225, 1933 ; t. 8, p. 187, 1935.
- M. MOUTON.
Thèse, Caen 1935 ; Recherches sur les propriétés physiques et les effets physiologiques d'une lumière colorée. *Sauvion et Lelièvre, Paris* 1935.

V. — TRANSPARENCE DES BROUILLARDS NATURELS.

- H. HENRIET.
Thèse, Paris, 1906 ; Ann. de l'Observ. de Montsouris, t. 7, p. 272, 1906.
- KING.
Proc. Trans. Roy. Soc., t. 38, p. 83, 1913.

- E. KARRER et E. TYNDALL.
Bull. of the Bur. of Stand., t. 16, p. 377, 1920.
- R. MECKE.
Ann. der Phys., t. 65, p. 257, 1921.
- F. BENFORD.
Gen. Elec. Rev., t. 29, p. 879, 1926.
- L.-P. GRANATH et E.-O. HULBURT.
Phys. Rev., t. 34, p. 140, 1929.
- F.-C. BRECKENRIDGE et J.-E. NOLAN.
Journ. of Research, Bur. of Stand., t. 3, p. 11, 1930.
- G. GRESKY.
Phys. Zeits., t. 32, p. 193, 1931.
- I. LANGMUIR et W. WESTENDORP.
Physics, t. 1, p. 273, 1931.
- C. MÜLLER, H. THEISSING et H. KIESSIG.
Zeits. des Verein. Deutsch Ing., t. 76, p. 925, 1932.
- BORN, DZIOBEK et WOLFF.
Zeits. für Techn. Phys., t. 14, p. 289, 1933.
- L. FOITZIK.
Die Naturwissensch., t. 22, p. 384, 1934.
- F.-C. BRECKENRIDGE.
Proc. of the Intern. Illum. Congress, Grande-Bretagne 1931, vol. 1, p. 463, Londres 1932.

VI. — VISIBILITÉ DES OBJETS ÉCLAIRÉS AU TRAVERS D'ATMOSPHÈRES LIMPIDES OU BRUMEUSES.

- a) *Projecteurs de guerre et de marine*
- A. BLONDEL.
Compt. rend. Acad. des Sci., t. 160, p. 114, 1915.
- J. REY.
De la portée des projecteurs. *Berger-Levrault, Paris* 1915.
- Y. ROCARD et P. de ROTHCHILD.
Rev. d'Opt., t. 6, p. 353, 1927; Bull. du Serv. Techn. et Indust. de l'Aéronautique, n° 45, Paris 1928.
- Y. ROCARD.
Rev. d'Opt., t. 11, p. 193, 257 et 439, 1932; Compt. rend. des réunions de l'Inst. d'Opt., 3^e année, 1932.
- J. RIVIÈRE et Y. ROCARD.
Rev. d'opt., t. 12, p. 160 et 205, 1933; Etude sur la visibilité. *Éditions de la Revue d'Optique, Paris* 1935.
- A. BLONDEL.
Rev. d'Opt., t. 13, p. 247, 1934.
- b) *Projecteurs d'automobiles*
- C. MUNSTER.
Zeits. für Techn. Phys., t. 14, p. 87, 1933.

M.-G. BENNETT.

The Illum. Eng., t. 26, p. 75, 1933.

A. BLONDEL.

Compt. rend. Acad. des Sci., t. 198, p. 1198, 1934.

A.-C.-S. VAN HEEL et J.-L. VAN SOEST.

De Ingénieur, 1935.

A.-H. STUART.

Engineering, t. 138, p. 107, 1934.

W.-S. STILES.

The Illum. Eng., t. 27, p. 313, 1934 ; Rapport du Comité national de l'Eclairage de Grande-Bretagne, Session de la Commission Internationale de l'Eclairage, Berlin 1935 ; The Illum. Eng., t. 28, p. 125, 1935.

VII. — ORIGINE DES BROUILLARDS NATURELS.

DÉTERMINATION DE LA GRANDEUR DES GOUTTELETTES.

A. ANGOT et C. BRAZIER.

Traité élémentaire de Météorologie. Gauthier-Villars, Paris 1928.

A. SCHMAUSS et A. WIGAND.

Die Atmosphäre als Kolloid. Vieweg, Brunswick 1929.

G.-I. POKROWSKI.

Zeits. für Phys., t. 43, p. 394, 1927.

G. STAMPE.

Zeits. für Instrum., t. 51, p. 400, 1931.

H.-G. HOUGHTON.

Physics., t. 2, p. 467, 1932.

F. BORN et K. FRANZ.

Das Licht, t. 8, p. 187, 1935.

VIII. — POLLUTION DE L'ATMOSPHÈRE PAR LES FUMÉES ET LES POUSSIÈRES.

Atmosphere Pollution. *Météorological Office, Londres* 1924.

F. BERTYN.

Compt. rend. Acad. des Sci., t. 193, p. 94, 1931.

A. ALLIX.

Compt. rend. Acad. des Sci., t. 195, p. 1301, 1932.

H.-L. WRIGHT.

Geophysical Memoirs, n° 57, *Météorological Office, Londres* 1932.

L. BESSON.

Compt. rend. Acad. des Sci., t. 186, p. 882, 1928 ; t. 197, p. 781, 1933.

R. HERMAN-MONTAGNE et L. HERMAN.

Bull. Soc. Franc. de Phys., n° 383, 1936.

SECONDE THÈSE

Propositions données par la Faculté

Le rôle de l'atmosphère gazeuse dans les lampes à incandescence

Vu et approuvé,
Caen, le 12 Mars 1936,
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
A. BLANC

Vu et permis d'imprimer,
Caen, le 12 Mars 1936,
Le Recteur de l'Académie de Caen,
L. MAIGRON

